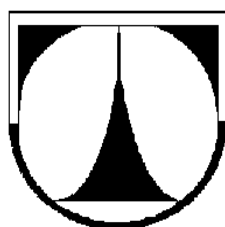


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**



# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

**Třecí vlastnosti kompozitu z polypropylenu  
vyztuženého přírodními vlákny**

**Friction properties of polypropylene composite  
reinforced with natural fibers**

Ondřej Dolenský

**KSP – TP – B**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Běhálek – TU v Liberci  
Konzultant bakalářské práce:

**Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	<b>47</b>
<b>Počet tabulek</b>	<b>11</b>
<b>Počet příloh</b>	<b>3</b>
<b>Počet obrázků</b>	<b>39</b>

**Datum: 25.05.2012**

# **A N O T A C E**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Ondřej Dolenský

Téma práce: Třecí vlastnosti kompozitu z polypropylenu vyztuženého přírodními vlákny

Friction properties of polypropylene composite reinforced with natural fibers

Číslo BP: KSP – TP – B

Vedoucí BP: Ing. Luboš Běhálek – TU v Liberci

Konzultant:

## **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá metodami měření třecích vlastností plastů a rozбором tribologických, resp. třecích vlastností polypropylenu plněného přírodními vlákny.

V experimentální části je popsána výroba kompozitního granulátu, ze kterého jsou vyrobeny zkušební tělesa pro měření třecích vlastností a s tím související drsnost povrchu.

## **Abstract:**

This work in the theoretical part deals with methods for measuring the friction properties of plastics and tribological analysis, respectively. frictional properties of polypropylene filled with natural fibers.

In the experimental section describes the production of composite granules from which test specimens are made to measure the frictional properties and the associated surface roughness.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....

Ondřej Dolenský  
Věry Kozákové 1247  
468 41 Smržovka

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Běhálkovi za odborné a systematické vedení bakalářské práce, poskytování rad a informačních podkladů.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Statický a dynamický součinitel tření</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Technologické faktory ovlivňující povrchové vlastnosti plastů</b>	<b>13</b>
2.2.1	Teplota taveniny	13
2.2.2	Teplota formy	13
2.2.3	Rychlost vstřikování	14
<b>2.3</b>	<b>Faktory ovlivňující tribologické vlastnosti plastů</b>	<b>14</b>
2.3.1	Krystalický podíl polymeru	15
2.3.2	Materiály pohybující se dvojice	16
2.3.3	Drsnost povrchu	17
2.3.4	Opotřebení povrchu	18
2.3.5	Povrchové úpravy plastů fluorací	19
2.3.6	Úprava vlastností radiačním síťováním plastů	21
2.3.7	Vliv maziva	23
2.3.8	Vliv aditiv	24
<b>3</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Charakteristika polymerní matrice</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Charakteristika přírodních vláken</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Příprava kompozitu</b>	<b>29</b>
3.3.1	Příprava přírodních vláken	30
3.3.2	Charakteristika aditiva SMART	31
3.3.3	Granulace za studena	32
<b>3.4</b>	<b>Výroba zkušebních těles vstřikováním</b>	<b>33</b>
<b>3.5</b>	<b>Stanovení drsnosti povrchu zkušebních těles</b>	<b>36</b>
<b>3.6</b>	<b>Stanovení koeficientu tření kompozitů</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>Hodnocení výsledků</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>45</b>
	Literatura	47
	Seznam příloh	

## Seznam použitých zkratek a symbolů

PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
PE	Polyetylen
PA	Polyamid
$F_s$	Třecí síla mezi plochami [N]
$F_n$	Normálová síla stykové plochy [N]
$F_{D+}$	Maximální dynamická třecí síla [N]
$F_{D-}$	Minimální dynamická třecí síla [N]
$\mu_s$	Statický koeficient tření [-]
$\mu_d$	Dynamický koeficient tření [-]
Mo	Molybden
S	Síra
C	Uhlík
H	Vodík
CH <sub>3</sub>	Methylová skupina
SEM	Snímek elektronovým mikroskopem
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (společnost s ručením omezeným)

## 1. Úvod

S ohledem na historii lze aplikaci kompozitů datovat do roku 1908, kdy bylo poprvé použito kompozitního materiálu na bázi fenolické pryskyřice zpevněné dřevěnou moučkou. V roce 1933 byla vyvinuta skelná vlákna firmou Owens-Illinois Glass Co., kde se začalo s jejich prvotní aplikací do polymerních materiálů, což stálo u vzniku kompozitního materiálu tzv. sklolaminátu, který našel široké uplatnění v celé řadě průmyslových odvětví. [1]. Postupně se k základní syntetické polymerní matici začala přidávat různá plniva, která zlepšovala mechanické, fyzikální a jiné užité vlastnosti polymerních látek, resp. kompozitů. V dnešní době se hledají nové materiály, které by se daly použít při výrobě plastů, aby se snížilo množství podílu syntetického materiálu ve výrobcích, díky rostoucím cenám ropy, ale také jejím klesajícím zásobám. Ropa je jednou ze základních surovin lidstva a to nejen pro výrobu pohonných hmot, ale právě také pro výrobu plastů. Velkou výhodou běžných plastů v porovnání s ocelí je například: nižší hustota, korozní odolnost, odolnost vůči většině chemických látek, apod. Nevýhodou může být horší nebo omezená recyklovatelnost některých polymerů, což může zatěžovat přírodní prostředí. Výrobci polymerů jsou téměř schopni dodávat materiál, který by odpovídal požadavkům jeho spotřebitelů ("materiál šitý na míru"). Snaha výrobců uspokojit požadavky zákazníků, vedla k velkým finančním dotacím na výzkum a vývoj nových polymerních kompozitů, které jsou složeny ze základní polymerní matrice, ke které je ve výrobě postupně přidáváno různorodé plnivo, které zlepšuje jeho užité vlastnosti. Jako plnivo mohou být použity látky syntetického, ale i organického původu (lze hovořit o tzv. biokompozitu), např. vlákna rostlinného a živočišného původu, které jsou zajímavé jak z cenového, tak environmentálního hlediska. Aplikace přírodních vláken se stala významnou materiálovou obměnou, která našla své uplatnění nejen v obalové technice, stavebnictví, ale také v automobilovém průmyslu. Výhodou přírodních vláken, při srovnání s ostatními vláknitými materiály je jejich nízká hmotnost, nízká abraze, spalitelnost, biodegradabilita a především nízká cena, která je nezávislá na ceně ropy. Nároky a požadavky spotřebitelů na mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti polymerů neustále rostou. Aplikace přírodních vláken v polymerech zvyšuje například jejich pevnost, tuhost, tvarovou stálost za vyšších teplot, apod. U dílců namáhaných třením je však nutné znát také jejich tribologické vlastnosti, které jsou spojeny s třením a opotřebením materiálu. A právě téma třecích vlastností kompozitů s přírodními vlákny a polypropylenovou maticí je předmětem této bakalářské práce, jejíž řešení bylo finančně podpořeno Technologickou agenturou České republiky v rámci projektu TA01010946.

Stanovené cíle bakalářské práce:

- Teoretický rozbor faktorů ovlivňující třecí vlastnosti polymerů a s tím související jakost povrchu.



- Provedení experimentálních měření a vyhodnocení závislosti tření a drsnosti povrchu u polypropylenu plněného různým procentuálním množstvím vybraných přírodních vláken.

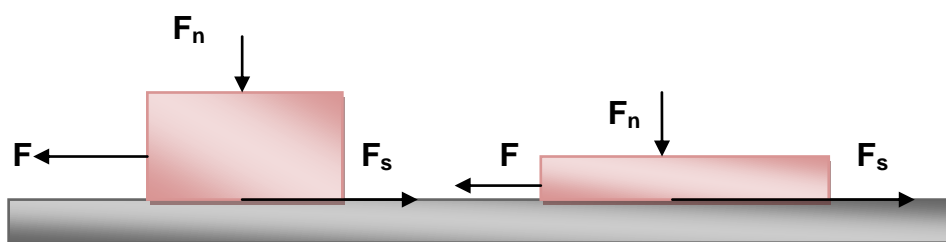
## 2. Teoretická část

### 2.1 Statický a dynamický koeficient tření

V historii vzniklo několik důležitých fyzikálních zákonů, které byly odvozeny z výsledků mnoha dlouhodobých experimentů. Jedni z předních pozorovatelů a objevitelů fyzikálních dějů byli L. da Vinci a I. Newton, kteří dokázali tyto fyzikální děje dobře popsat a podle určitých zákonitostí i vysvětlit. Tyto pokusy byly důležité také pro odvození několika pravidel souvisejících s tribologickými vlastnostmi materiálů:

- Statického tření, které musí těleso překonat při zahájení vlastního pohybu, a které je větší než tření dynamické.
- Třecí síly, která je úměrná normálové síle.
- Tření nezávislého na velikosti stykové plochy.

Tření je způsobeno silami působícími na rozhraní mezi dvěma pohybujícími se povrchy (viz obr. 2.1). Velikost těchto sil je závislá na vlastnostech stykových ploch a to především na jejich porézności a drsnosti povrchu materiálu. Velikost a místo působení síly je špatně předvídatelné. Vlastnosti povrchu (postupná deformace povrchu, opotřebení, otěr a oxidace) se mění v závislosti na čase [2].



Obr. 2.1 : Rozložení sil při pohybu tělesa po desce

Tření není závislé na velikosti styčných ploch mezi tělesy, ale je závislé na vlastnostech ovlivňujících jejich vzájemný kontakt, jako například drsnost povrchu. Vlastnosti kontaktu mezi dvěma povrchy jsou často vyjadřovány koeficientem tření  $\mu$ . Koeficient statického (klidového) tření  $\mu_s$  mezi dvěma povrchy je definován jako poměr tangenciální smykové síly ku normálové síle mezi plochami, viz rovnice (1). Toto tření může vzniknout například při vyhazování výrobku z formy, kde by mohlo mít nežádoucí vliv na výslednou kvalitu povrchu vstřikovaného dílu.

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_n} \quad (1)$$

$F_s$  ... statická třecí síla [N]

$F_n$  ... normálová síla stykové plochy [N]

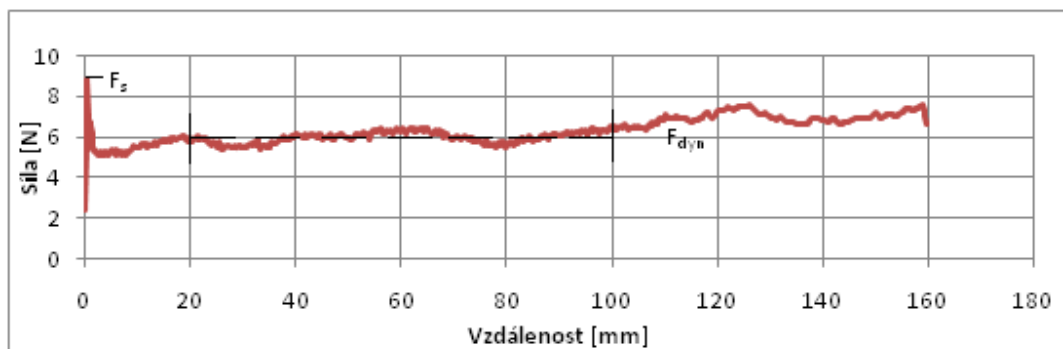
Koeficient dynamického (kinematického) tření  $\mu_D$  se získává z průměrné třecí síly nutné při zachování makroskopického relativního pohybu na dráze. Jeho hodnota je měřitelná za vrcholem působení statického tření, kde dochází k jeho fluktuaci okolo střední hodnoty, která je závislá na vzdálenosti a rychlosti pohybu, viz rovnice (2).

$$\mu_D = \frac{1}{2} \left( \frac{|F_{D+}|}{F_n} + \frac{|F_{D-}|}{F_n} \right) \quad (2)$$

$F_{D+}$ ,  $F_{D-}$  ... maximální a minimální hodnoty dynamické třecí síly [N]

$F_n$  ... normálová síla stykové plochy [N]

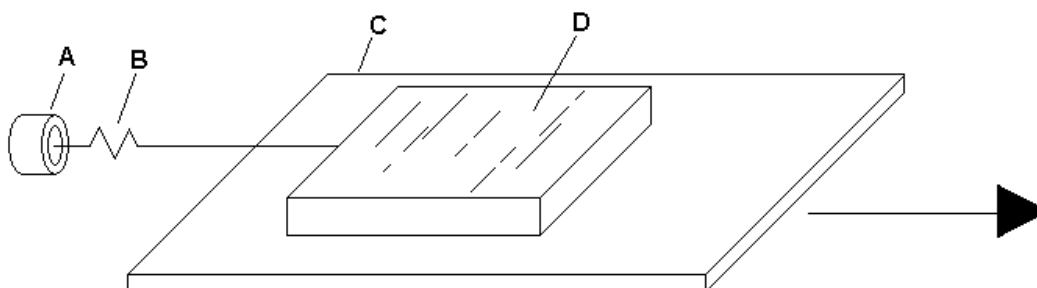
Na obr. 2.2 lze pozorovat hodnotu statického koeficientu tření, resp. statické třecí síly, která je zde znázorněna jako maximální hodnota po začátku pohybu. Hodnota dynamického tření se stanoví z průměrné třecí síly po překonání statického tření na určitém délkovém úseku.



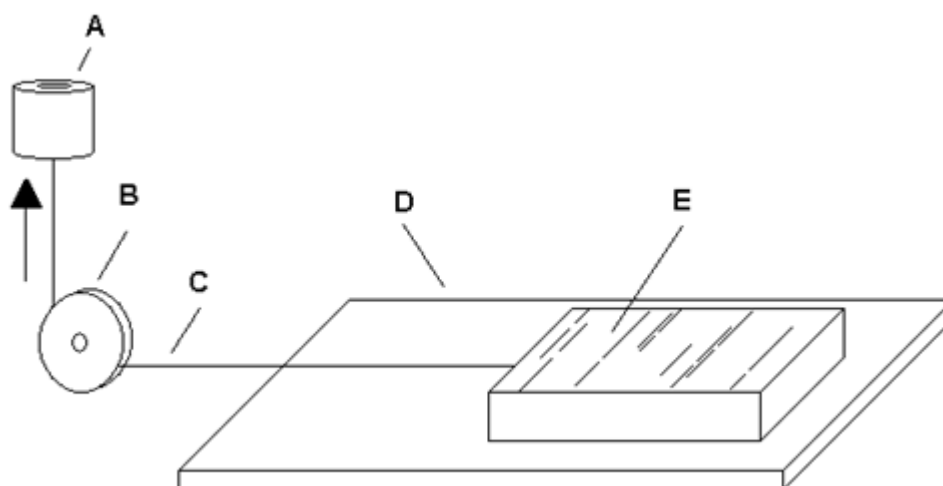
Obr.2.2 : Průběh třecí síly PP ve styku s eloxovaným hliníkem  
 $F_S$  - statická třecí síla,  $F_D$  - dynamická třecí síla

Pro stanovení koeficientu tření u plastů, resp. plastových dílů neexistuje v současnosti mezinárodní předpis, který by předepisoval stanovení koeficientu tření u desek a malých výrobků s tloušťkou nad 1 mm, dostupná je však norma ČSN EN ISO 8295, která specifikuje metodu pro stanovení koeficientu pro počáteční a smykové tření plastové fólie a desky a to při vzájemném smýkání nebo při smýkání po jiné látce [3]. Principem této zkoušky je to, že plochy, které mají být zkoušeny, se umístí tak, aby došlo k jejich vzájemnému dotyku v rovině pod stejnoměrným tlakem. Síla, která je potřebná k rozpočívání zkoušených materiálů, se zaznamenává do grafu jako silový průběh na dráze. Obecně je takové zařízení složeno z vodorovného zkušebního stolu, saní a hnacího mechanismu. Hnací mechanismus vytváří relativní pohyb mezi saněmi a zkušebním tělesem, aniž by záleželo na tom, která část je pohyblivá [3].

Na obr. 2.3 je znázorněna varianta, kde pohyb vykonává zkušební stůl a těleso je upevněno k snímacímu zařízení, které zaznamenává průběh působící síly na dráze stolu a na obr. 2.4 naopak varianta, kde pohyb je vykonán zkušební destičkou a stůl je nepohyblivý.



*Obr. 2.3 : Zařízení s pohyblivým stolem  
A – snímací zařízení, B – pružina, C – pohyblivý stůl,  
D – přípravek se zkušebním tělesem*



*Obr. 2.4 : Zařízení s pevným stolem.  
A – snímací zařízení, B – kladka, C – ocelové lanko,  
D – nepohyblivý stůl, E – přípravek se zkušebním tělesem*

Zkušební zařízení by mělo splňovat následující základní podmínky:

- Stůl by měl být vyroben z neferomagnetického materiálu (vhodný je například hliník).
- Povrch stolu by měl být rovný a hladký (pro jeho výrobu je vhodné použít dokončovací operace, např. leštění, lapování, nebo povrchové úpravy například eloxování).
- Pohyb vyvolávající proces tření by měl být bez vibrací.

U zkušebních těles musí být věnována maximální pozornost čistotě zkoušeného povrchu, aby bylo zabráněno změně charakteru povrchu. Zkoušené plochy musí být očištěny od otisků prstů, prachu a cizích látek.

## **2.2 Technologické faktory vstřikování ovlivňující povrchové vlastnosti plastů**

Podmínky tření jsou ovlivňovány povrchovými vlastnostmi pohybujících se dílů, které jsou v případě plastových výstřiků ovlivněny celou řadou technologických a konstrukčních faktorů, ale také vlastnostmi polymerního materiálu. Jednou z důležitých vlastností polymerů je jejich zabíhavost (tekutost), která má vliv na kvalitu povrchu vstřikovaného plastového dílu a také na orientaci plniva ve výrobku, apod. Tuto vlastnost lze ovlivnit při výrobě nastavením technologických parametrů (zejména teplotou taveniny, teplotou formy a rychlostí vstřikování), které jsou popsány v následujících kapitolách 2.2.1 až 2.2.3. Kvalitu stavu povrchu výrobku lze ovlivnit nejen technologickými parametry, ale také vhodnou volbou konstrukčních parametrů, které spolu úzce souvisí: konstrukce vstřikovací formy, použitý materiál na formu, povrchová úprava formy, dezénování, atd.

### **2.2.1 Teplota taveniny**

Teplota taveniny je důležitou veličinou, která může snadno měnit zabíhavost plastu. Obecně lze doporučit používání teploty pokud možno co nejvyšší, neboť tavenina má vysokou tekutost, takže stačí nízký vstřikovací tlak, což je pozitivní z hlediska reziduálního napětí ve výstřiku. Na druhé straně však vyšší teplota taveniny vyžaduje delší dobu chlazení hmoty ve formě a je příčinou většího smrštění výstřiku [4]. Důležitou vlastností, která je spojena s teplotou taveniny, je její homogenita. Tyto dva parametry spolu úzce souvisí, neboť s rostoucí teplotou může dojít k teplotní degradaci materiálu a poškození kvality povrchu vstřikovaného dílu.

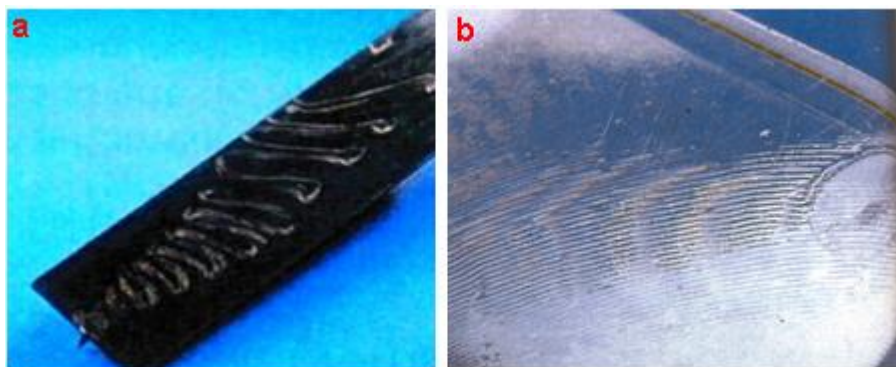
### **2.2.2 Teplota formy**

Teplota stěny formy je jedním z technologických parametrů, který významně ovlivňuje dobu cyklu a má vliv na kvalitu povrchu výstřiku. Teplota formy nemá velký vliv na tekutost taveniny. Nízká teplota formy, která má za následek rychlejší chlazení a tuhnutí výstřiku, je vhodná z ekonomického hlediska, ale na druhé straně rychlé ochlazení vede k velkému vnitřnímu napětí ve výstřiku (což je příčinou tvarové a rozměrové nestálosti), k snížení obsahu krystalického podílu v polymeru (který negativně ovlivní koeficient tření materiálu), k zhoršení kvality povrchu dílu, apod. Tvarovou a rozměrovou stabilitu výrobku zajišťuje vysoká teplota stěny formy a její homogenní rozložení po celé tvarové dutině. Nevhodná konstrukce temperačního systému formy a špatná údržba temperačních kanálů mají za následek místní (lokální) teplotní rozdíly na povrchu tvarové dutiny formy [4]. Tyto vyjmenované jevy mohou mít vliv na: různou orientaci plniva, deformaci výstřiku a jeho povrchové vady (nerovnoměrný lesk nebo nerovnoměrné okopírování dezénu), apod.

### 2.2.3 Rychlost vstřikování

Úkolem vstřikovací rychlosti je naplnit tvarovou dutinu formy v co nejkratším časovém intervalu při nejmenším smykovém namáhání dopravované taveniny. Průběh rychlosti vstřikování lze nastavit konstantní pro celou dobu pohybu šneku, nebo v závislosti na jeho poloze.

Při nastavování vstřikovací rychlosti je nutné si uvědomit, že pomalá rychlost plnění formy může způsobit volný proud taveniny na povrchu výstřiku, tzv. jetting, zejména při nevhodné konstrukci vtokového ústí (viz obr. 2.5a). Když se tavenina dotkne při plnění formy s jejím povrchem, téměř okamžitě začíná tuhnout. Vysoká rychlost vstřikování má dobrý vliv na orientaci makromolekul, ale je zde velká hodnota smykového namáhání, což může mít za následek degradaci materiálu. U materiálů s minerálními plnivy (talek, uhlíčitán vápenatý) je vhodnější pomalejší plnění za účelem dosažení požadované jakosti povrchu. Konstantní a co možná nejvyšší rychlost vstřikování zajistí více času na přeuspořádání orientace řetězců makromolekul a u částečně krystalických materiálů zabrání zamrzání toku taveniny v důsledku začínající krystalizace během plnění dutiny formy. Profilovaná vstřikovací rychlost zamezí vadě typu "gramofonová deska" (viz obr. 2.5b) [5].



Obr. 2.5 : Příklady povrchových vad výstřiků [6]  
a) jetting, b) gramofonová deska

### 2.3 Faktory ovlivňující tribologické vlastnosti plastů

Tribologie je vědní obor, zabývající se procesy tření, opotřebení a mazání. Tribologické, resp. třecí vlastnosti plastů mohou být ovlivňovány řadou faktorů, zejména krystalickým podílem polymeru, materiály pohybující se dvojice (některé plasty mají nízký koeficient tření při kontaktu s ocelí, viz tab. 2.1), povrchem stykových ploch a jejich drsností, povrchovou úpravou materiálu, měrným tlakem, kluznou rychlostí, způsobem odvodu tepla vznikajícího třením ad. [4]. O vlivu základních faktorů ovlivňující tribologické vlastnosti plastů, zejména kluzné vlastnosti, resp. koeficient tření pojednávají následující kapitoly 2.3.1 až 2.3.8.

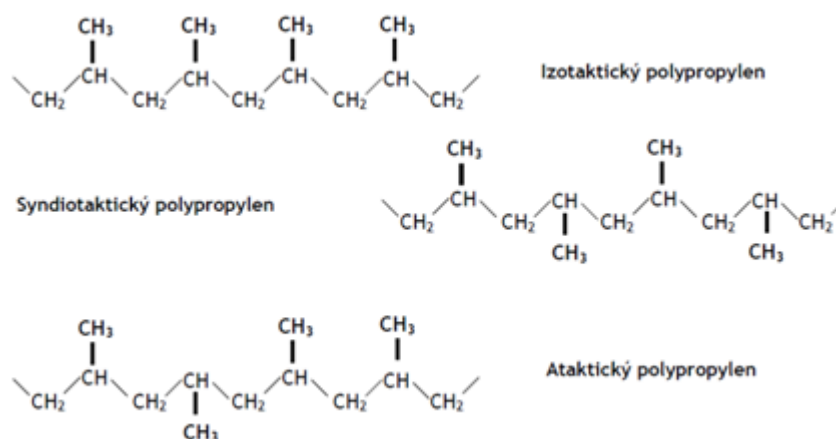
Tab. 2.1: Koeficient tření mezi různými polymery a měkkou ocelí [4]

Polymer	Hodnota ( $\mu$ )
Polytetrafluorethylen	0,04 až 0,1
Polyformaldehyd	0,1 až 0,3
Polyamid	0,2 až 0,4
Tvrzená tkanina na bázi fenolformaldehydové pryskyřice	0,2 až 0,4

### 2.3.1 Krystalický podíl polymeru

U semikrystalických plastů jsou jejich tribologické vlastnosti, resp. koeficient tření závislé na obsahu krystalického podílu ve struktuře, tzv. stupni krystalinity. Koeficient tření klesá se zvyšujícím se stupněm krystalinity. Stupeň krystalinity, tj. pravidelnost uspořádání makromolekul na nadmolekulární úrovni je do značné míry dán chemickými předpoklady materiálu (chemickým složením a stavbou makromolekul), ale také technologickými podmínkami zpracování, resp. kinetickými podmínkami ve fázi tuhnutí a chladnutí taveniny plastu. Vyššího stupně krystalinity se dosahuje pomalým chlazením taveniny plastu, tj. např. při vyšší teplotě formy a době chlazení v technologickém procesu vstřikování, popřípadě přidávky nukleačních činidel do polymeru [4, 5].

Jak bylo uvedeno výše, kromě kinetických podmínek zpracování, je stupeň krystalinity ovlivněn chemickými a strukturními předpoklady plastů. Základní stavební jednotkou plastů jsou monomery, jež se shlukují do větších, uspořádaných nebo neuspořádaných celků, které tvoří polymery (amorfní nebo semikrystalické). Podstatou monomerů jsou chemické látky na bázi přírodních nebo syntetických sloučenin. Tyto monomery se dále shlukují podle vnitřního uspořádání a vazeb mezi molekulami do lineárních, rozvětvených nebo síťovaných struktur [7], přičemž vyšší krystalinity bude zaznamenáno u polymerních materiálů s lineárními řetězci makromolekul. U některých technických polymerů (např. u polypropylenu) lze asymetricky uspořádat monomerní jednotky, na které jsou vázané substituenty. Typem uspořádání monomerů dostáváme rozmanité konfigurace struktury materiálu. V závislosti na umístění substituentu (v případě polypropylenu se jedná o methylovou skupinu) pod nebo nad řetězcem, lze popisovat tzv. stereoregularitu polymeru, související s mírou takticity (viz obr. 2.6). S rostoucí takticitou (pravidelností uspořádání substituentu) roste stupeň krystalinity, ale také teplota tání, pevnost a tvrdost materiálu, tzn. izotaktický polymer, resp. polymer s vyšší mírou takticity bude dosahovat vyššího stupně krystalinity, na rozdíl od syndiotaktického a ataktického polymeru.



Obr. 2.6 : Molekulární struktura (takticita) u polypropylenu [7]

### 2.3.2 Materiály pohybující se dvojice

U konstrukce mechanických součástí, kde vznikne předpoklad pro suché tření, lze použít dvě základní varianty sestavení třecích ploch a to plast – (ne)kov nebo plast – plast.

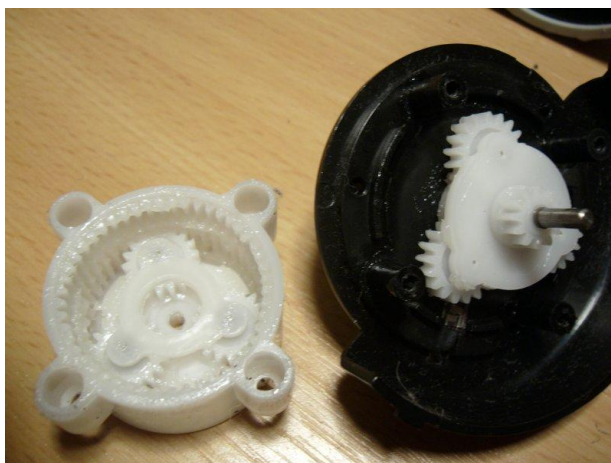
- **(Ne)kovový materiál - plast**

Tření se uskutečňuje ve velmi malé vrstvě materiálu, kde působí adhezní a mechanické vlastnosti. Velikost koeficientu tření je často větší u povrchů s malou drsností, neboť je pohyb ploch uskutečňován na velké ploše s velkou přilnavostí k povrchu a vzniká tak větší třecí síla. Zatížení a rychlost pohybu třecích ploch ovlivňuje významně velikost koeficientu tření a míru opotřebení součástí [8].

- **Polymer - polymer**

Široké použití polymeru a kompozitu založených na bázi polymeru je často používáno pro dobré vzájemné mechanické a tribologické vlastnosti a speciálně v suchých spojeních, kde není potřeba používat mazivo. Tření mezi polymery může být uskutečněno adhezí nebo deformací. Koeficient tření u kombinace dvou polymerů roste se vzájemnou rostoucí adhezí. Při suchém tření dvou polymerních povrchů vzniká třecí teplo, které může být redukováno nebo potlačeno přidavkem maziv. Vzájemného kontaktu polymerů je využíváno u drobných mechanismů. Často tohoto spojení bývá využito v kancelářských zařízeních, jako jsou například kopírky, elektrická ořezávátka, otočné židle (viz obr. 2.7), nebo v hračkářském a modelářském průmyslu [8].

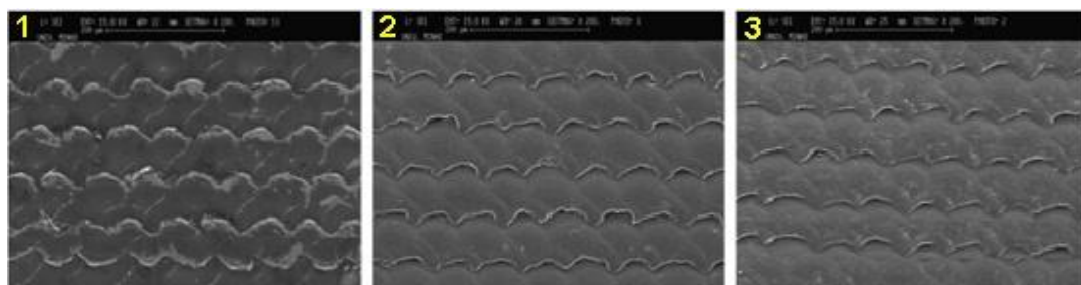




*Obr. 2.7 : Příklad použití kontaktu polymer – polymer (kolečko otočné židle)*

### 2.3.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je velmi důležitý parametr při kontaktu dvou kovových součástí, nikoliv však až tak u plastových dílů, neboť všechny nerovnosti se v provozu zarovnají. Pro každý plast existuje optimální drsnost ocelové součásti, kdy je tření minimální [4]. Poroste-li hladkost povrchu výrobku, budou se úměrně zvětšovat adhezní síly mezi povrchy a koeficient tření bude narůstat. Naopak s rostoucí drsností, než je optimální hodnota, bude růst míra opotřebení povrchu. Snahou je, aby výsledná drsnost byla co nejmenší, protože má velký vliv na kvalitu celkového povrchu a míru opotřebení, ale také na jeho třecí vlastnosti, které lze ovlivnit mazivem (viz kap. 2.3.7). Podstatné pro protilehlé povrchy je, aby byla jejich plocha hladká, protože u hrubých povrchů se velikost tření mění skokem a ovlivňuje hodnoty koeficientu tření. Nicméně pojmy jako hladkost a drsnost jsou otázkou kvalitativní, protože pro každý materiál nelze určit konkrétní hodnoty, které budou vypovídat o tom, zdali vyhovují jednomu nebo druhému kritériu. Většina plastů vykazuje nižší koeficient tření při kontaktu drsných povrchů spíše, než u hladkých [2]. Na obr. 2.8 lze pozorovat, jak se tavenina plastu při vstřikování do dutiny formy snaží okopírovat její povrch a vytvořit si svoji drsnost povrchu.

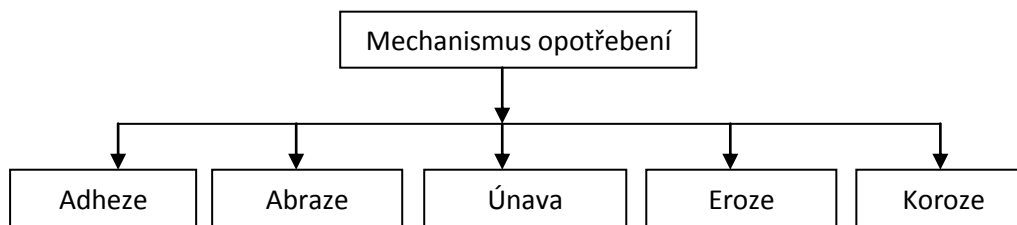


*Obr.2.8 : Topografie povrchu formy a vstříknutých dílů pod mikroskopem (SEM zvětšeno 200x) [1]*

*1- povrch ocelové lišty, 2 – materiál z PC, 3 – materiál z PP*

### 2.3.4 Opotřebenění povrchu

Pod opotřebením si lze představit odebrání mikroskopických částí z třecího povrchu nebo narušování celistvosti povrchu materiálu, které mají vliv na třecí vlastnosti [9]. Opotřebenění povrchu nevzniká čistě jenom třením, ale existuje několik možností, jak k němu může dojít. Možnosti vzniku opotřebenění jsou znázorněny na obr. 2.9.



Obr. 2.9 : Schéma druhů opotřebenění plastového dílu [8]

- Koroze

K opotřebení povrchu korozí dochází často tam, kde je povrch polymeru vystaven účinku vody, případně chemické sloučenině, která vyvolá na jeho povrchu chemickou reakci. Třením dojde k mechanickému odstranění (opotřebení) povrchu polymeru.

- Eroze

Eroze povrchu polymeru se může vyskytnout u polymerů, které budou dlouhodobě vystaveny nepříznivým vlivům (dopad tvrdých částic na povrch polymeru).

- Únava

Dlouhodobým namáháním materiálu mohou na jeho povrchu vzniknout mikrotrhlínky (případně může dojít k únavovému lomu na povrchu plastového dílu), a tím významně ovlivnit hodnotu součinitele tření.

- Abraze

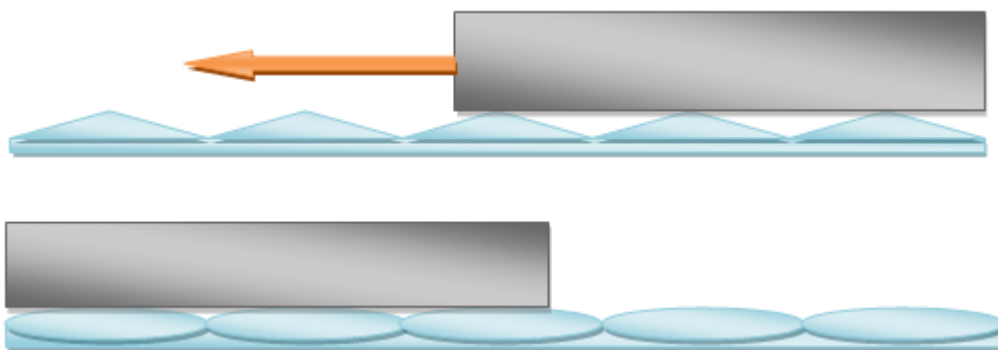
Odolnost proti otěru je jednou z důležitých vlastností povrchu při kluzném tření polymerů.

- Adheze

Velikost míry adhezivního opotřebenění je úměrná drsnosti povrchu plastového dílu (viz kap. 2.3.3). Na příliš hladkém povrchu se zvyšuje adheze i tření.

Opotřebenění je přímým důsledkem stejných procesů, které způsobují tření. Velikosti opotřebenění je závislá na drsnosti povrchu, působícího tlaku na třecí plochu, teplotě, kluzné rychlosti a způsobu mazání [9].

Při vzájemném kontaktu dvou povrchů (odlišných materiálů), dochází k odebrání a narušování povrchu u obou součástí i přesto, že je jeden povrch hrubší, než ten druhý (viz obr. 2.10). Na začátku pohybu je tření malé. S rostoucí mírou opotřebení se povrchy uhlazují a roste jejich adheze a součinitel tření do konstantní hodnoty, která se už dále nebude měnit. Všeobecně odolnost proti otěru závisí na schopnosti materiálu odolávat opakovaným deformacím povrchu [9].



*Obr. 2.10 : Opotřebení povrchu plastového dílu před a po třecím pohybu*

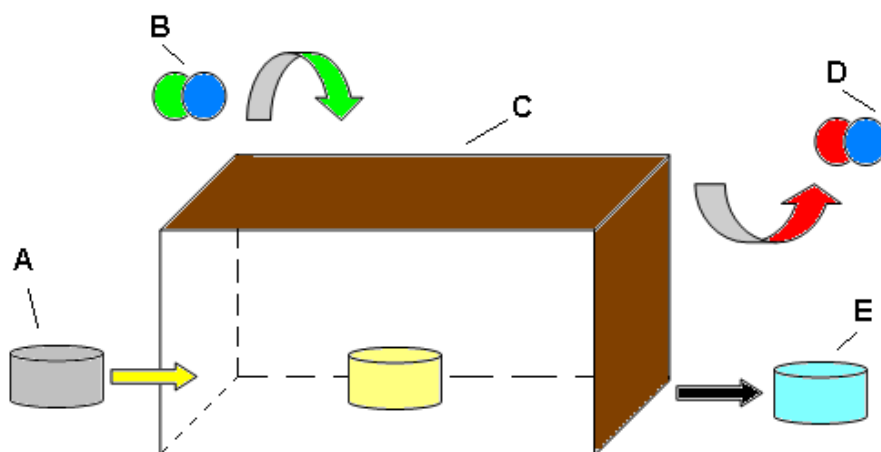
### **2.3.5 Povrchové úpravy plastů fluorací**

Správně zvolená povrchová úprava snižuje tření pevných součástí, což minimalizuje opotřebení a výrazně snižuje spotřebu energie. Při volbě polymeru k výrobě konstrukčního dílu se přistupuje především vzhledem k jeho nízké hustotě, ceně, snadné zpracovatelnosti a skutečnosti, že polymery na rozdíl od kovů nekorodují. Dalšími kritérii pro výběr vhodného polymeru jsou jeho fyzikální, mechanické a teplotní vlastnosti. Najde-li se vhodný materiál pro zpracování, často se stane, že povrch výrobku neodpovídá požadavkům, a proto se v dokončovacích operacích mnohdy (s ohledem na aplikaci dílu) přistupuje k povrchové úpravě dílu, která je jedinou alternativou k dosažení požadovaných vlastností [10].

Povrch je tak jedinou vlastností dílů (materiálu), kterou lze nezávisle na ostatních měnit [11]. Jednou z možných úprav povrchu je fluorace, při níž jsou povrchy plastových dílů vystaveny působení fluorové směsi ve vakuové komoře (viz obr. 2.11). Žádoucí změny povrchu způsobuje fluor díky vysoké reaktivitě a není třeba je iniciovat dalším přívodem elektrické energie. Princip procesu fluorace spočívá na tom, že je výrobek uzavřen do vzduchotěsné komory a nechá se přes něj proudit směs fluoru a dusíku v poměru 10:90, dokud nedosáhne potřebné koncentrace. Doba styku povrchu materiálu a působící směsi je dobře kontrolovatelná, neboť složení směsi, její teplota a doba proudění jsou automaticky říditelné.

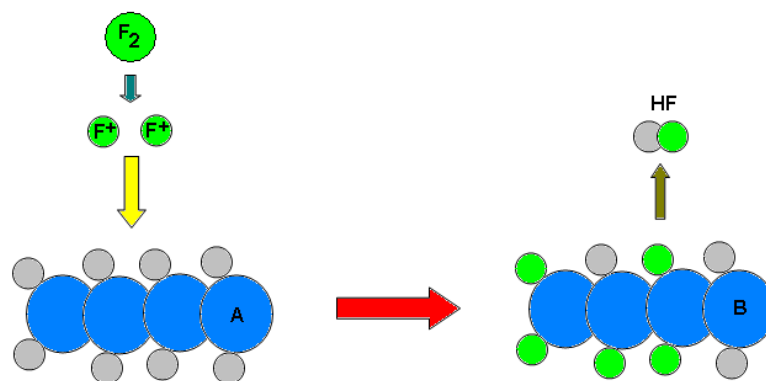
Při fluoraci plastů dochází k postupnému nahrazování vodíkových atomů atomy fluoru (viz obr. 2.12), přičemž počet nahrazovaných atomů lze regulovat a dosáhnout tak požadovaných vlastností povrchu při zachování vlastností plastů jako celku, neboť hloubka vniku atomů fluoru leží v molekulární oblasti povrchu materiálu a neovlivní strukturální bázi materiálu, ale ovlivní pozitivně především smáčivost, přilnavost, koeficient tření, difúzi a permeaci (prostupnost) plynů a kapalin (např. u palivových nádrží), apod. Všechny tyto vlastnosti vycházejí z povrchové energie makromolekul a polarity povrchu. Tento proces je vhodný pro většinu druhů polymerů, protože je zaručena homogenita povrchu materiálu. Další faktory, které jsou použity pro tuto úpravu povrchu, jsou zaručeny v maximální bezpečnosti a šetrnosti vůči životnímu prostředí a také vůči samotnému výrobku. Povrchové vlastnosti dosažené fluorací (proces je nevratný) jsou dlouhodobě stabilní a metoda umožňuje měnit vlastnosti povrchu dílu, aniž by došlo k ovlivnění jeho mechanických a tepelných vlastností (např. na rozdíl od radiačního sítěvání) [10, 11].

Fluorace se osvědčila tam, kde je nutná úprava povrchu před následnou technologickou operací, například lakováním, polepováním, potiskováním, laminováním nebo lepením. Fluorace je využito v široké škále průmyslových odvětví. Místo pro její uplatnění bylo nalezeno v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, elektrotechnice, textilním průmyslu, lékařské technice nebo při výrobě obalů. V konkrétních příkladech se jedná o minimalizaci tření konstrukčních dílů [11].



Obr. 2.11 : Proces fluorace

A – vstupní polymerní díl, B – přívod fluoru, C – reakční (vakuová) komora,  
D – výstupní zbytkové plyny, E – výstupní díl s fluorovaným povrchem



Obr. 2.12 : Fluorační reakce

*A – nefluorovaný polymerní řetězec, B – fluorovaný polymerní řetězec*

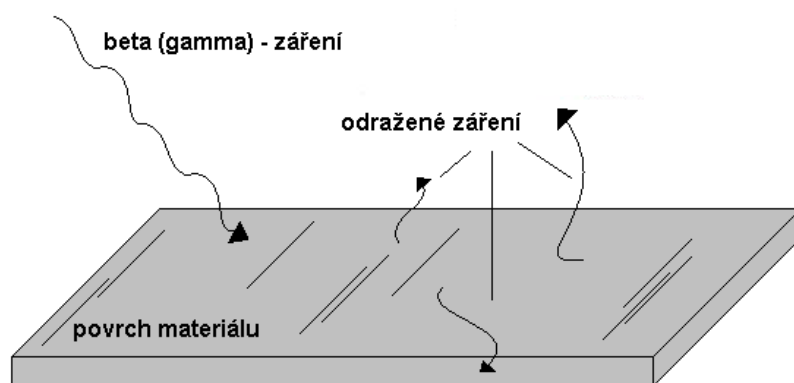
### 2.3.6 Úprava vlastností radiačním síťováním plastů

Tribologické vlastnosti polymerů lze pozitivně ovlivnit také radiačním síťováním plastů. K cílenému zesíťování plastů se v současnosti používá především elektronové beta-záření (urychlenými elektrony). Příležitostně se pro objemnější výrobky používá i gamma záření, s ohledem na vyšší hloubku jeho průniku [12].

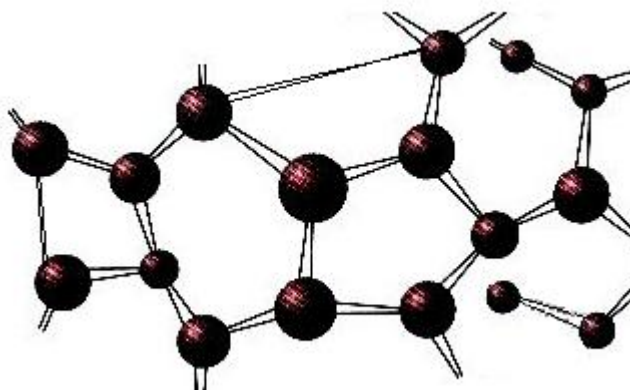
Při úpravě povrchu materiálu radiačním síťováním se jedná o formu zušlechťování konstrukčních polymerů za účelem zlepšení jejich vlastností. Tuto metodu reprezentuje německá firma BGS GmbH. (Beta-Gamma-Service). Výhoda technologické operace radiačního síťování spočívá především v tom, že jí lze použít na finálních dílech, tedy po vlastním zpracovatelském procesu. Princip celého procesu je založen na tom, že povrch materiálu je bombardován urychlenými elektrony o vlnové délce odpovídající  $\beta$  záření, resp.  $\gamma$  záření v případě ovlivnění vlastností materiálu do větší hloubky (viz obr. 2.13). Síťovací reakce radiačním zářením postihují u semikrystalických plastů v makromolekulární struktuře hlavně oblasti amorfni, popřípadě méně krystalické. Celý proces probíhá při pokojové teplotě a bez dodatečného namáhání ozařovaných dílů. V zařízeních, které slouží jako urychlovače elektronů, se pracuje s vysokými intenzitami dávek ozáření, ale s omezenou hloubkou pronikání, která je závislá na množství energie. Využití takto upravených materiálů je v celé řadě odvětví počínaje automobilovým průmyslem, zdravotnictvím, elektrotechnikou až po obalový průmysl. Široké uplatnění najdeme při zpracování výrobků z PUR, PVC, PE, PA [13]. U některých polymerů, jako je například PVC, je nutné použít síťovací činidlo (triallylcyanurát =TAC), které umožní zpustit celý proces bez degradace materiálu. Energie ze záření je pohlcována na povrchu výrobku a dochází ke vzniku radikálů (rozpadem vazeb C–H), které postupně reagují spolu s materiálem. Následnou chemickou reakcí dojde ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury (prostorové sítě), viz obr. 2.14. Spojením dvou volných

radikálů mezi sousedními řetězci (vznikne vazba C–C ). Vazebnou reakcí dojde u polymerů k síťování, jenž je určeno dávkou ozáření, a to je příčinou změny vlastností materiálu. Pronikáním gamma kvantových částic do materiálu dojde k různým procesům, při nichž vznikají sekundární (excitované) elektrony, které jsou aktivátory pro ionizaci molekul v materiálu (viz obr. 2.15) [12].

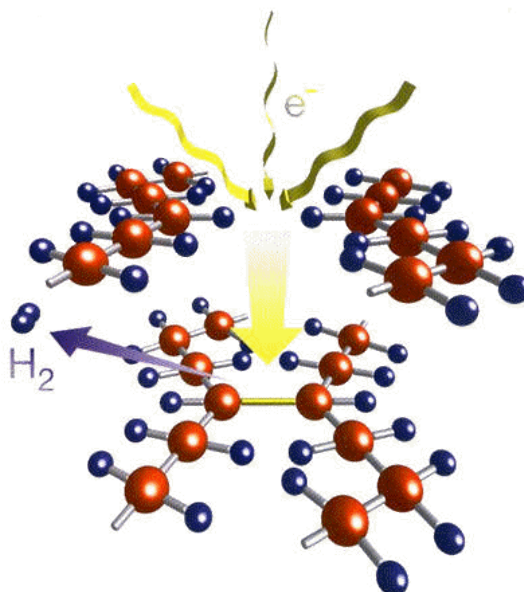
Celkové efekty elektronového záření na materiál jsou: zvýšení stupně „zesíťení“, zlepšení vlastností proti opotřebení, snížení koeficientu tření, zvýšení teploty skelného přechodu, zvýšení tvarové stálosti za tepla, zvýšení meze teplotní použitelnosti, snížení koeficientu tepelné roztažnosti, menší kríp, zlepšená pevnost a odolnost vůči trhlinám vzniklých pnutí. Radiačním síťováním jsou modifikovány plasty, jimž lze dát vlastnosti, jaké jinak nalézáme jen u “high performance” polymerů a je možné tak zajistit požadavek, aby plastové převody byly spolehlivé a funkční bez údržby i za extrémně vysokých teplot (nad 150 °C). Standardní (neozářené) plasty však při těchto teplotách začínají měknout a nejsou schopny již přenášet stejné síly jako při nižší nebo pokojové teplotě [13].



Obr. 2.13 : Dopadající záření na povrch materiálů



Obr. 2.14 : Prostorová síť ve struktuře polymeru



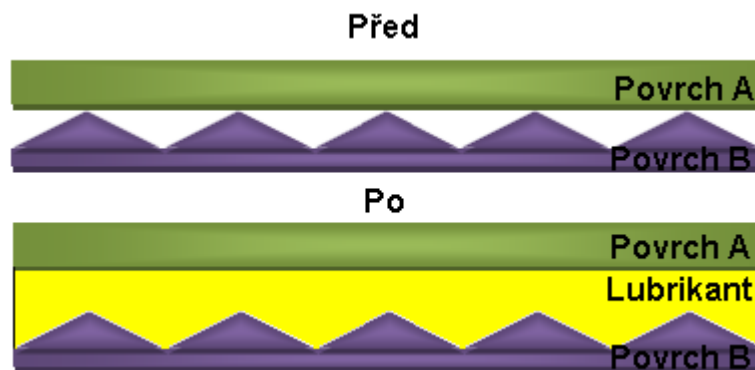
Obr. 2.15 : Ionizace molekul v materiálu

### 2.3.7 Vliv maziva

Použitím maziva se snižuje koeficient tření povrchů, a také se jím odvádí vzniklé třecí teplo. Maziva jsou používána u polymerních materiálů, jejichž zpracování by mohlo být obtížné. Přidáním maziva může dojít k ovlivnění vzhledu výrobku. Maziva mohou být na bázi organických nebo syntetických sloučenin, případně jejich kombinací. Za účelem lepšího vyjmutí výrobku z formy se na jeho povrch aplikuje tenký film maziva (oleje, tuky, vosky) [8], který by mohl ovlivnit konečný výrobek při třecím kontaktu s jiným materiálem. Vznikne-li velká třecí síla a míra opotřebení při suchém tření, bude jednou z možností, jak snížit tyto jevy, aplikace maziva mezi kontaktní povrchy.

Přidané mazivo je voleno tak, aby dostatečně přilnulo k povrchu polymeru a vytvořilo na něm tenkou vrstvu, která sníží hodnotu koeficientu tření a míru opotřebení povrchu (viz obr. 2.16). Musí se však dát pozor na použití vhodného maziva vůči polymeru a to z důvodu rozpustnosti některých plastů v chemických sloučeninách, které by mohly být v mazivu obsaženy. Použitá maziva by neměla být těkavá, aby nedošlo k uvolnění zdraví škodlivých látek do ovzduší, a také by měla být dobře odstranitelná z povrchu polymeru. Voda není vhodným mazivem. Použití vody je vhodné k odstranění nečistot z třecích ploch a k chlazení povrchu při jejich velkém namáhání [8]. Použití lze oleje k impregnaci povrchu polymeru, který slouží jako ochrana před prvotním opotřebením.





Obr. 2.16 : Aplikace lubrikantu mezi dva kontaktní povrchy

### 2.3.8 Vliv aditiv

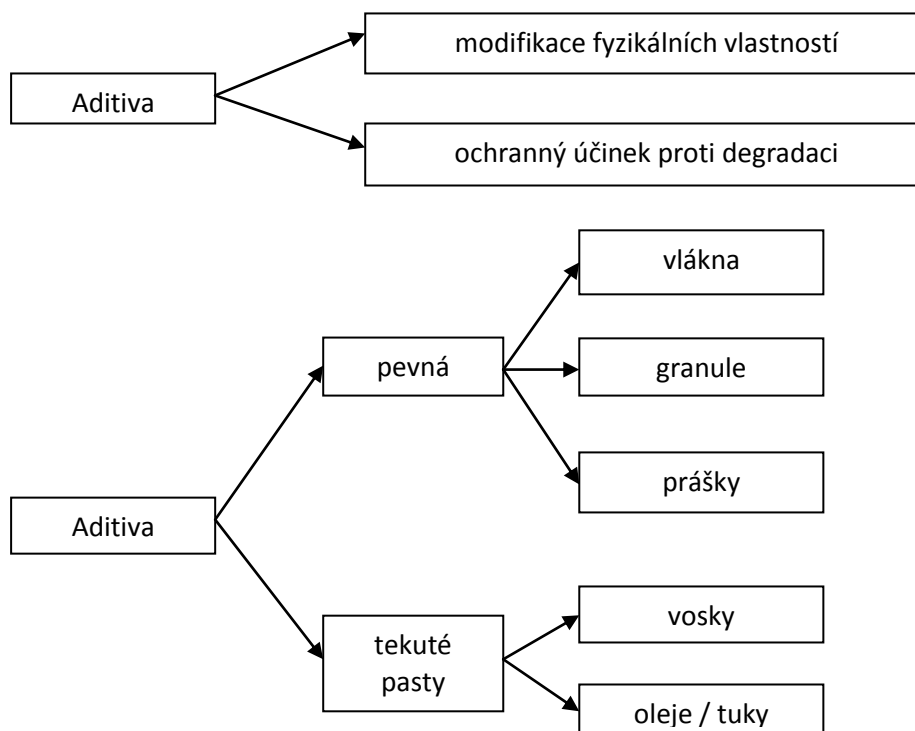
Aditiva jsou přísady, které změny fyzikální, strukturní nebo chemickou podstatu plastu a to za účelem zlepšení jeho vlastností nebo podmínek při jeho zpracování. Hlavním nedostatkem většiny polymerních materiálů je jejich velmi nízká teplotní odolnost a odolnost světelnému záření, která má za následek degradaci materiálu, vysoká hořlavost, nízká tvrdost apod. Pro zlepšení užitečných vlastností plastů jsou tyto povrchy aktivovány, popřípadě jsou používány různé typy kopolymerů, polymerních směsí a kompozitů. Aditiva přidávaná do plastů musí splňovat následující obecné požadavky:

- zajistit stabilitu plastu při provozních podmínkách,
- nesmí mít nežádoucí účinky na vlastnosti plastů
- musí být dostatečně účinná.

Aditiva mohou být účinkem vnějších chemikálií vyloučena na povrch plastového dílu, a tím zásadně ovlivnit jeho smykové vlastnosti [14]. Aditiva lze rozdělit podle několika kritérií, na obr. 2.17 jsou aditiva rozdělena podle účinku a podle stavu, ve kterém jsou dodávána. Převážná většina plastů bude obsahovat plastifikační činidla, která jsou důležitá pro úpravu polymeru při jeho výrobě. Z výše uvedených důvodů (s ohledem na životnost součástí) obsahují plasty celou řadu různých aditiv. Jednou ze skupin jsou tzv. antidegradanty, jejichž úkolem je zamezit řetězové oxidaci povrchu dílu působením kyslíku za vysokých teplot. Jednou z důležitých podskupin antidegradantů jsou světelné stabilizátory, které zabraňují oxidaci povrchu vlivem UV záření (často jsou používány saze). Do stejné skupiny jako světelné stabilizátory patří antioxidanty, jejichž funkcí je ochránit povrch plastového dílu proti různým chemickým vlivům, kterým by mohl být vystaven v závislosti na jeho použití. Naopak aditiva označovaná jako antiozonanty jsou důležitá pro kaučuky, neboť zabrání narušování povrchu a vzniku prasklin v důsledku působení ozónu. Mezi důležité přísady do plastů patří také plniva. Plnivy lze zlepšit mechanické vlastnosti jako např. pevnost, oteřuvzdornost, třecí vlastnosti, houževnatost, atd. [14].



Plniva mohou být částicová a vláknitá v jednotkách mikrometrů nebo nanometrů (tzv. nanoplniva). Běžně používanými plnivy, která zlepšují kluzné vlastnosti, jsou například grafit, talek nebo  $\text{MoS}_2$  [14]. Vyztužující plnivo v kompozitu zvyšuje jeho pevnost, houževnatost, tvarovou odolnost. Na druhou stranu snižuje jeho ohebnost, tažnost, smrštění a kluzné vlastnosti s výjimkou uhlíkových vláken. Dále zlepšují nerozpustnost a odolnost materiálu vůči chemikáliím, navlhavost, včetně zvýšení jakosti povrchu výstřiku a zvýšení lesku.



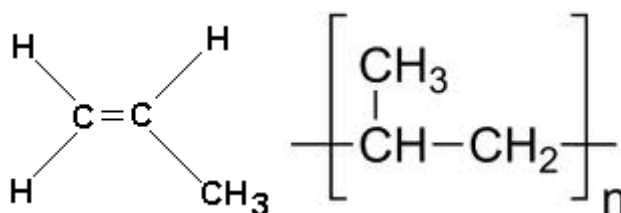
Obr. 2.17 : Obecná charakteristika (rozdělení) aditiv polymerů

### 3. Experimentální část

Podstatou experimentální části bakalářské práce je hodnocení kluzných vlastností kompozitu z polypropylenové matrice plněné přírodními vlákny. K experimentálnímu měření byla použita přírodní vlákna rostlinného a živočišného původu: vlákna kokosu, celulózy, lnu a ovčí vlny. V první fázi bylo nutné připravit samotný kompozit, z něhož byla následně zhotovena zkušební tělesa pro stanovení koeficientu tření. Hodnocena byla také drsnost jejich povrchu, neboť se jedná o důležitý faktor, ovlivňující kluzné vlastnosti materiálu. V následujících kapitolách je charakterizován nejen vlastní průběh experimentu, ale také příprava kompozitu, včetně charakteristiky přírodních vláken a polymerní matrice.

#### 3.1 Charakteristika polymerní matrice

Jako základní složka pro experimentální část byl zvolen polymerní materiál polypropylen. Stavební jednotkou polypropylenu je monomer, jehož struktura je zobrazena na obr. 3.1. Monomerní jednotka PP je složena ze dvou atomů uhlíku, tří atomů vodíku a jedné methylové skupiny ( $\text{CH}_3$ ). Chemická reakce, která spojuje jednotlivé monomery polypropylenu, se nazývá kationtová polymerace. Výsledná struktura polymerní struktury PP je zobrazena na obr. 3.1, kde označení "n" udává polymerační stupeň.



Obr. 3.1 Chemické složení polypropylenu  
molekula monomeru (vlevo), polymerní jednotka (vpravo)

Při volbě polymeru bylo nutné respektovat skutečnost, že přírodní vlákna jsou citlivá na teplotu (dochází k jejich degradaci) a jako limitní teplota taveniny polymerní matrice byla respektována teplota 210 °C (max. doporučená teplota uváděná v odborné literatuře) [14]. S ohledem na výše uvedené a také na skutečnost, že řešení bakalářské práce je podpořeno výzkumným projektem TA01010946 byl k experimentálnímu měření vybrán polypropylen THERMOFIL E020M (výrobce Sumika Polymer Compounds), materiál z portfolia polymerů používaných při výrobě plastových dílů v automobilovém průmyslu (ve firmě Magna Exteriors & Interiors Bohemia s.r.o.) a v předešlých výzkumných pracích na katedře strojírenské technologie, zabývajících se problematikou aplikace přírodních vláken v polymeru. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1. : Vlastnosti polypropylenové matrice [15].

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Objemový index toku taveniny	14,7	[cm <sup>3</sup> /10min]
Mez kluzu	27	[MPa]
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	5	[%]
Napětí v tahu při přetržení	16	[MPa]
Poměrné prodloužení při přetržení	39	[%]
Vrubová houževnatost Charpy (+23°C)	9	[KJ/m]
Vrubová houževnatost Charpy (-35°C)	4	[KJ/m]
Pevnost v ohybu	35	[MPa]
Tvrdost - Shore D	59	[-]
Teplota průhybu při zatížení (1,80 MPa)	58	[°C]
Teplota tání	166	[°C]
Teplota krystalizace	125	[°C]

### 3.2.Charakteristika přírodních vláken

K studii kluzných vlastností kompozitu byly použity přírodní materiály ve formě vláknitých plniv a to mimo jiné v důsledku možnosti náhrady dnes používaných přísad v polymerech, např. minerálních plniv, skelných vláken, apod. Předností přírodních vláken je především jejich nízká hmotnost, biodegradabilita, nízká abraze snižující opotřebení forem při zpracování plastů (na rozdíl od jiných vláknitých materiálů používaných při výrobě kompozitů) a také nízká cena, nezávislá na ceně ropy (surovinovému zdroji pro výrobu syntetických polymerů) [16].

Přírodních vláken existuje značné množství. Z hlediska původu existují dvě skupiny vláken: rostlinného nebo živočišného původu. V souladu se zadáním bakalářské práce byla k experimentálnímu měření použita následující vlákna:

- *Vlákna rostlinného původu*

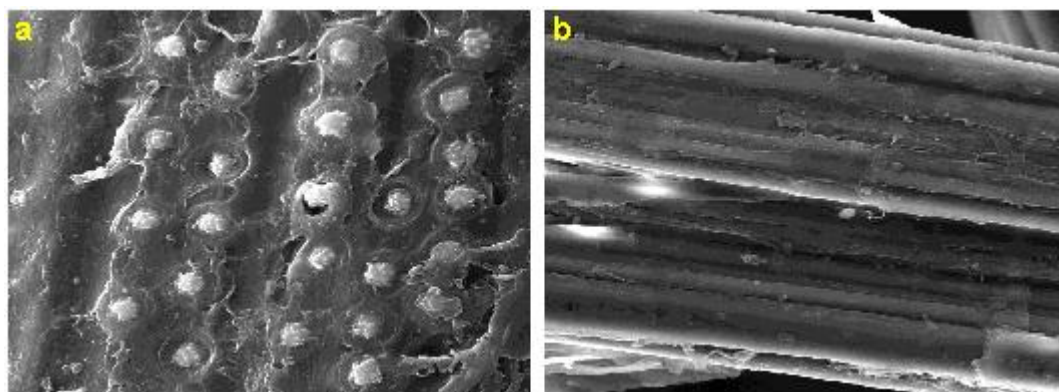
**Kokosové vlákno**, jehož mikroskopický snímek je uveden na obr. 3.2a pochází z kůry plodů kokosové palmy. Kvalitní, pružná vlákna se získávají z nedozrálých ořechů. Kůra plodů se několik měsíců máčí v mořské vodě, aby se svazky vláken uvolnily od pektinového obalu, pak se rozvolňují na jednotlivá vlákna k dalšímu použití. Délka vláken je 15 - 35 cm, tloušťka 0,3 - 1 mm (cca. 25x hrubší než bavlna) a jejich tažnost 25 - 37 % je nejvyšší ze všech celulózových vláken. Vlákno má vysokou pevnost v oděru, je pružné a odolné proti hnilobě a dobře izoluje proti hluku [16].

**Lněné textilní vlákno** (mikroskopický snímek viz obr. 3.2b) se získává ze stonku lnu setého. Ten se sklízí vytrháváním (vytažením) rostliny s kořínky, aby byla zachována přirozená délka lněných vláken, která jsou umístěna v lýkové vrstvě rostliny. Sklizený len se vyčesává po odstranění semen. V surovém lnu tvoří jednotlivá 20 – 50 mm dlouhá vlákna. Elementární vlákno je v průměru o něco delší a pevnější, než například bavlna. Pevnost lnu se za mokra zvyšuje až o 20 %. Vlákna mají malou pružnost a dobrou tepelnou vodivost [16].

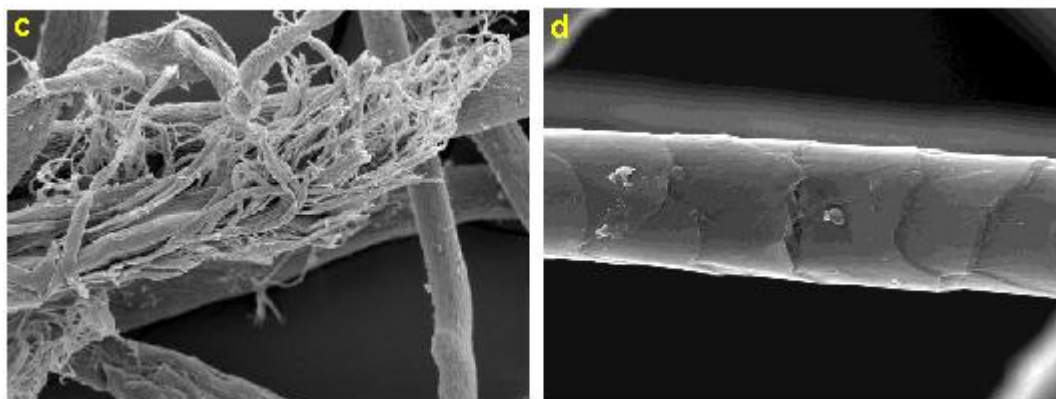
**Celulóza** (starším názvem buničina), je polysacharid sestávající z beta-glukózy. Jednotlivé glukózové jednotky jsou spojené vazbou  $\beta$  1,4 a tvoří dlouhé, nerozvětvené řetězce, které jsou zcela nerozpustné ve vodě. Celulóza (mikroskopický snímek vlákna viz obr. 3.2c) je hlavní stavební látkou rostlinných primárních buněčných stěn a spolu s ligninem se podílí na stavbě sekundárních buněčných stěn povrchu [16].

- *Vlákna živočišného původu*

**Ovčí vlna** je surovina ze srsti ovce domácí. Vlna se stříhá jednou nebo dvakrát do roka. Ostříhána vlna se ukládá jako celistvé rouno dle kvality, ale i dle průměru (v experimentální části byla použita vlákna ovčí vlny o průměru 16  $\mu$ m). Surová vlna obsahuje v průměru jen méně než polovinu váhového množství přírodních vláken, 10 – 45 % je tuk a pot, 5 – 20 % jsou nečistoty. Mimo toho mohou vlákna pojmout až 20 % vlhkosti. Tuk a pot se odstraňuje praním a rostlinné příměsi se karbonizují. Čisté vlákno se skládá z keratinu, pigmentu a chemicky vázané vlhkosti. Z chemických prvků je 50 % zastoupen uhlík, 40 % kyslík a dusík. Povrch vlákna je šupinovitý (viz mikroskopický snímek na obr. 3.2d). Zvláštní struktura řetězcové molekuly dává vláknu vynikající pružnost a ohebnost. Je to ale na úkor menší pevnosti než u jiných přírodních vláken. Při zvýšené vlhkosti vlákno ztrácí dalších 10-20% ze své pevnosti [16].



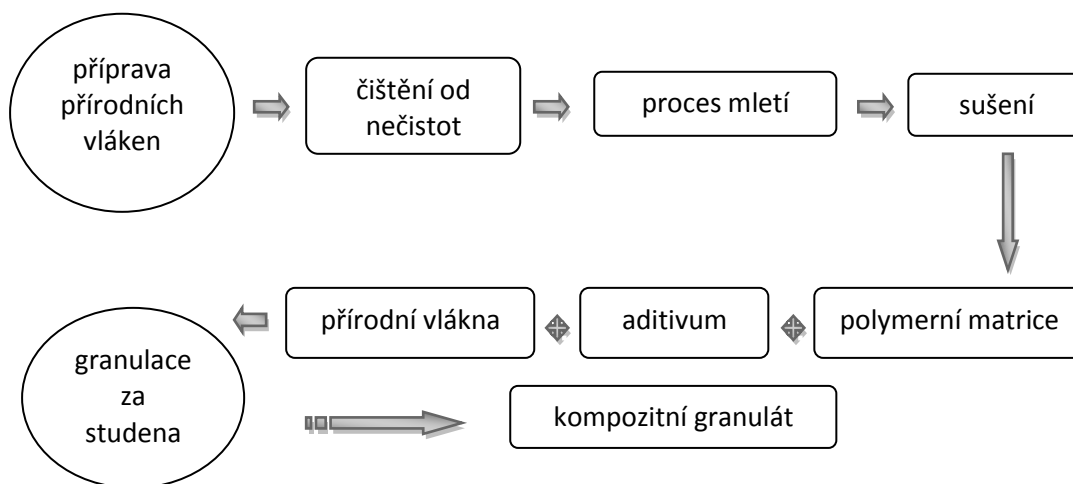
Obr. 3.2 Mikroskopický snímek přírodních vláken (SEM) [15]  
a) kokosové vlákno, b) lněné textilní vlákno



Obr. 3.2 Mikroskopický snímek přírodních vláken (SEM) [15]  
c) celulózové vlákno, d) vlákno ovčí vlny

### 3.3 Příprava kompozitu

Kompozit byl zhotoven granulací za studena. V první fázi bylo nutné připravit plnivo, resp. přírodní vlákna (viz kap. 3.3.1), která byla následně přidávána k polymerní matici v poměru 10 až 30 hm.%. Pro zvýšení kompatibility plniva s polypropylenovou maticí (nejen z fyzikálního hlediska, ale zejména z hlediska chemického) bylo použito aditivum zvyšující adhezi mezi polárními hydrofilními přírodními vlákny a nepolární hydrofobní polypropylenovou maticí. Pro tyto účely bylo použito v předchozích výzkumech ověřené aditivum Smart (viz kap. 3.3.2). Průběh celého procesu přípravy kompozitního materiálu je na obr. 3.3.



Obr 3.3 : Schéma přípravy kompozitu

### 3.3.1 Příprava přírodních vláken

Prvním krokem přípravy přírodních vláken byla jejich úprava, tj. zbavení vláken od drobných organických nečistot, tuků, atd., které se mohly dostat do plniva při jeho samotné výrobě, nevhodné manipulaci nebo nevhodném skladování. Pro následný technologický proces výroby kompozitu granulací za studena bylo nutné upravit vlákna z hlediska jejich délky mletím (viz obr. 3.4). K mletí byl použit nožový střížný mlýn RETSCH SM 300 (viz obr. 3.5) s otáčkami  $3000\text{ min}^{-1}$  a se sítí s lichoběžníkovými otvory  $0,75\text{ mm}$ . Na základě předešlých studií na katedře strojírenské technologie se optimální délka namletých přírodních vláken z hlediska kvality povrchu a také s ohledem na konečné užité vlastnosti kompozitu doporučuje v rozmezí  $0,5$  až  $2\text{ mm}$  [15].



*Obr. 3.4: Vstupní a výstupní vlákna kokosu z mlecího mlýnu*



*Obr 3.5: Nožový střížný mlýn RETSCH SM 300*

Základním a nezbytně nutným požadavkem pro další zpracování vláken bylo snížení jejich obsahu vlhkosti sušením, neboť vodní páry vzniklé při granulaci, která probíhá za zvýšených teplot, by významným způsobem snížily kvalitu spojení vláken s polypropylenovou matricí. K sušení za podmínek 80 až 100 °C, po dobu 2 až 4 hod. bylo použito skříňové sušárny VENTICELL (viz obr. 3.6) s nucenou cirkulací vzduchu, zaručující homogenní rozložení teploty v procesu sušení.



*Obr. 3.6 : Sušící zařízení Venticell*

### **3.3.2 Charakteristika aditiva Smart**

Přírodní vlákna jsou působením hydroxylových skupin velmi polární (hydrofilní) a mohou tak způsobit nedostatečnou adhezi s nepolární hydrofobní matricí, proto je nutné u polypropylenové matrice použít vhodného aditiva.

Pro experimentální měření bylo použito nově vyvinuté a patentované aditivum Smart od výrobce DOW Corning. Toto reakční aditivum se dodává v kapalně formě ve dvou spolu reagujících složkách. Celé aditivum je založeno na reakci radikálového činidla štěpící polyolefinový řetězec na volné radikály, které reagují s přidaným nenasyceným monomerm (zastoupen složkou A). Nejčastěji se používá 4-vinylanilin, 3-glycidyl sorbát a další, které pomohou napojit nenasycené složky na základní polyolefinickou matrici. Další důležitou složkou aditiva smart je organosilikonová sloučenina (složka B), jako je například aminopropyl-triethoxysilan, 3-isokianatpropyl-trimethoxysilan, atd., schopná reakce se složkou A. Nedílnou součástí funkce složky B je obsah funkční skupiny, kterou je možné hydrolyzovat. Za přítomnosti hydrolyzačního katalyzátoru a vlhkosti dochází k hydrolyze složky B, na kterou adují funkční skupiny přírodních vláken. Průběh tohoto děje se odstartuje už při teplotách větších než 120°C a to přímo v extrudéru při průběhu kompaundace. Takto dojde ke spojení nepolární polypropylenové matrice a polárního přírodního vlákna [17].



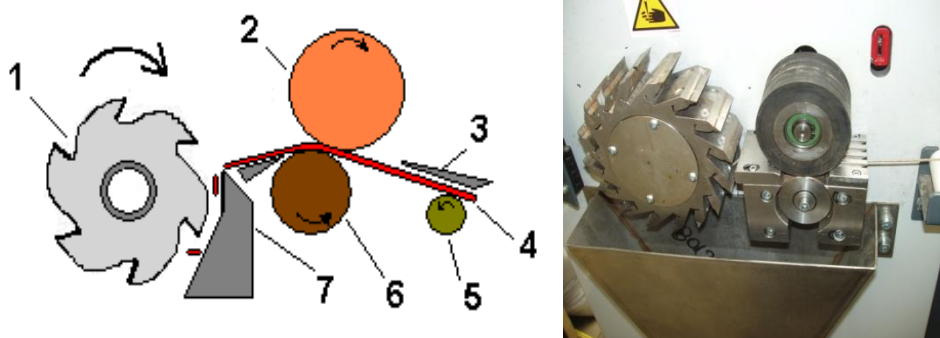
### 3.3.3 Granulace za studena

Posledním krokem přípravy kompozitu je proces granulace za studena, kdy k základní syntetické polymerní matici bylo přidáno aditivum a přírodní vlákna. Konečným produktem je granulát, který je vhodný pro další zpracování kompozitu, tj. k přípravě zkušebních těles pro stanovení kluzných vlastností materiálu. Ke granulaci byla použita granulační linka ZAMAK EHP-2x130di (viz obr. 3.7).



Obr. 3.7: Granulační linka ZAMAK.

Granulační linku tvoří dvoušnekový extrudér se segmentovými šneky umožňující jejich proměnnou délku, plastikační komora, granulační hlava na struny, vodní lázeň o teplotě chladicího média 15 °C, vodící válečky, ventilátor a nožový mlýn s podavači na sekání struny (viz obr. 3.8).



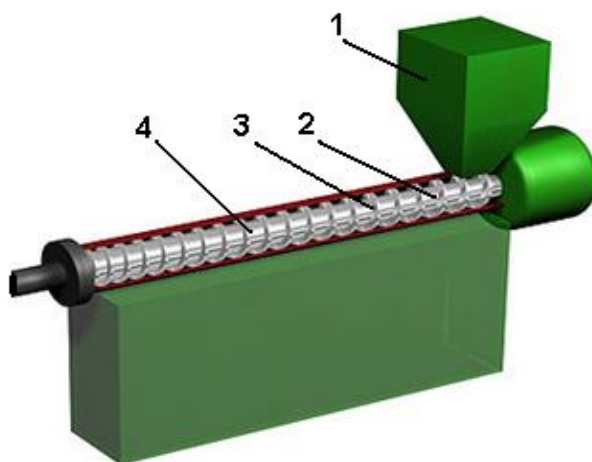
Obr. 3.8: Princip granulace strun za studena

1 – nožový buben, 2 – horní posuvný válec, 3 – vodící přípravek, 4 – struny,  
5 – naváděcí válec, 6 – spodní vodící válec, 7 – držák nože

Vstupní surovinou pro granulaci je základní polymerní matrice, mleté přírodní vlákno a aditivum. Aditivum bylo dávkováno přímo do tavicí komory extrudéru před samotným přidáním přírodních vláken, která byla dávkována v oblasti přední pozice šneku tak, aby nedošlo k jejich poškození smykovým namáháním při hnětení a plastikaci materiálu nebo tepelnou degradací (viz obr. 3.9). Polypropylenová matrice byla vložena do násypky vytlačovacího



stroje, odkud byl materiál dávkován do tavicí komory. Zde byl za účinku teplotního ohřevu (180 až 200 °C) a tlaku vyvolaného rotací šneku (180 ot/min) plastikován. V tavicí komoře bylo v určitých zónách dávkováno aditivum a později i přírodní vlákna (viz obr. 3.2). Vytlačovaná struna se po ochlazení sekala na požadovanou délku granulí (ca. 2 až 3 mm). Výstupní surovinou po granulaci za studena byl granulát kompozitu s obsahem aditiva a přírodních plniv.



*Obr. 3.9 : Schématický náčrt míst pro dávkování vláken a aditiv*

- 1 – násypka s termoplastickou matricí, 2 – šnek,  
3 – doporučené místo pro dávkování aditiv,  
4 – doporučené místo pro dávkování přírodních vláken*

### **3.4 Výroba zkušebních těles vstřikováním**

Pro hodnocení třecích vlastností kompozitních materiálů byly z připraveného granulátu zhotoveny vstřikováním zkušební tělesa ve tvaru desky o rozměrech 50 x 50 x 4 mm. Před vlastním procesem vstřikování bylo nutné granulát v důsledku navlhavosti přírodních vláken, ale také v důsledku jeho styku s vodou ve fázi granulace, sušit a to za podmínek 80 °C, po dobu 3 hod. (s ohledem na typ polymerní matrice). Technologické parametry při vstřikování zkušebních těles jsou uvedeny v tab. 3.2. Při jejich nastavení byl brán zřetel na geometrii výstřiku a na teplotní odolnost přírodních vláken. Bylo tedy nutné nastavit parametry plastikace, především teplotu taveniny tak, aby nedošlo k degradaci struktury vláken (max. přípustná teplota taveniny je 210 °C, viz kap. 3.1). Zkušební tělesa byla zhotovena na vstřikovací stroji ARBURG 270S 400-100 (viz obr. 3.10). Technické parametry vstřikovací jednotky stroje jsou uvedeny v tab. 3.3 a pro uzavírací jednotku v tab. 3.4 (pro výrobu zkušebních těles byl použit šnek o průměru 25 mm).

Pro výrobu zkušebních destiček byla použita vstřikovací forma s výměnnou tvarovou vložkou, odpovídající tvaru desky o rozměrech 50 x 50 x 4 mm, tj. dvounásobná vstřikovací forma (viz obr. 3.11) s filmovým ústím vtoku (viz obr. 3.12). Pro lepší rozlišení výsledků bylo na vzorcích určeno, která strana bude líc a rub. Rubová strana odpovídá tvárnici a lícni strana odpovídá tvárníku. Všechna zkušební tělesa po výrobě byla kondicionována a také zkoušena při standardních podmínkách 23/50 dle ČSN EN ISO 291.

Tab. 3.2 Procesní parametry vstřikovacího cyklu

Parametr	Hodnota	Jednotky
Průměr trysky	3	[mm]
Vstřikovací rychlost	25	[cm <sup>3</sup> /s]
Bod přepnutí na dotlak	15	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dávky (na počátku)	40	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost polštáře	10-12	[cm <sup>3</sup> ]
Doba dotlaku	20	[s]
Doba chlazení po dotlaku	16	[s]
Doba cyklu	45	[s]
Vstřikovací tlak	3	[MPa]
Uzavírací tlak	14	[MPa]
Dotlak	35	[MPa]
Teplota temperačního média	30 – 50	[°C]
Teplota taveniny (topných pásem)	180 - 210	[°C]



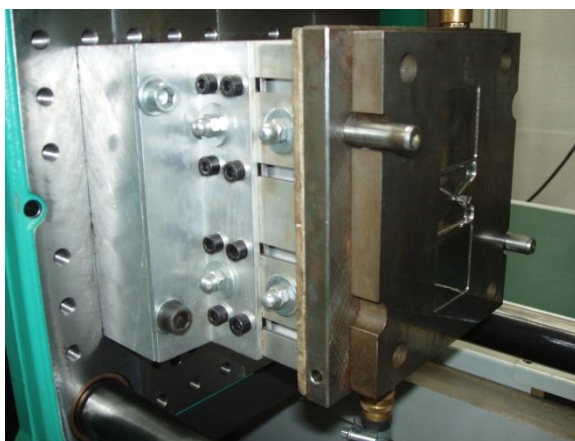
Obr. 3.10 : Vstřikovací lis ARBURG 270S 400-100

Tab. 3.3 Parametry vstřikovací jednotky [15]

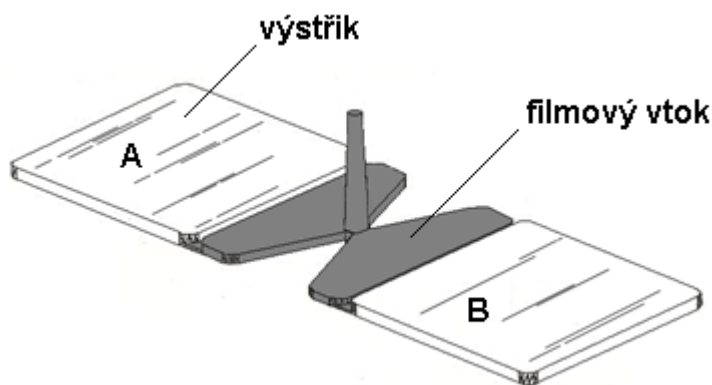
Parametr	Hodnoty			Jednotky
Průměr šneku	20	25	30	[mm]
Délka šneku	25	20	16,7	[L/D]
Zdvih dávkování	100			[mm]
Max. otáčky šneku	28	35	42	[ot/min]
Plastifikační výkon	5,5	8	9,5	[kg/hod]
Vstřikované množství	64	100	146	[cm <sup>3</sup> /s]
Max. objem zdvihu	31	49	71	[cm <sup>3</sup> ]
Max. hmotnost výlisku	29	45	65	[g]
Specifický vstřikovací tlak	2500	2000	1390	[bar]
Zdvih agregátu	180			[mm]
Přídržná síla trysky	50			[KN]
Počet topných pásů	4			[-]

Tab. 3.4 Parametry uzavírací jednotky [15]

Parametr	Hodnoty	Jednotky
Uzavírací síla	400	[KN]
Dráha otevření lis. nástroje	350	[mm]
Min. vestavěná výška formy	200	[mm]
Max. otevření upínacích desek	500	[mm]
Velikost upínacích desek (horizontální x vertikální)	380x380	[mm]
Zvětšené upínací desky (horizontální x vertikální)	380x380	[mm]
Vzdálenost mezi sloupky (horizontální x vertikální)	270x270	[mm]
Šířka vypadávací šachty	300	[mm]
Zdvih vyhazovače	100	[mm]
Síla vyhazovače	20	[KN]
Běh naprázdno (dle Euromap 6xzdvih)	1,2x189	[s x mm]



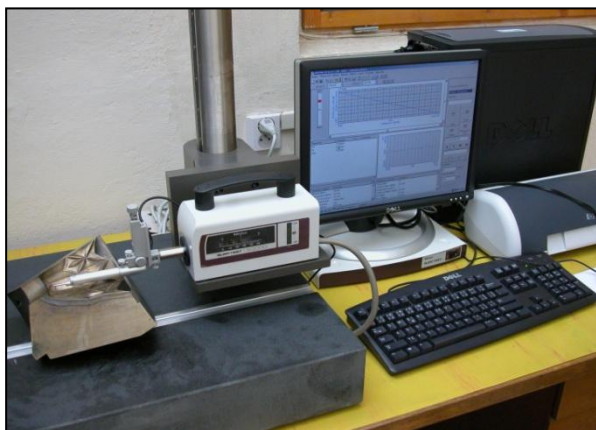
Obr. 3.11 : Dutina vstřikovací formy



Obr. 3.12 : Zkušební výstřiky tvaru desky s filmovým ústím vtoku

### 3.5 Stanovení drsnosti povrchu zkušebních těles

Drsnost je jedním ze základních ukazatelů stavu kvality povrchu. Drsnost povrchu je definována jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě, případně při dalším technologickém zpracování. Do drsnosti povrchu se nezahrnují vady povrchu (náhodné nepravidelné nerovnosti, které se objevily na povrchu ojediněle, jako jsou například rysy, trhlinky, důlky a jiné), které vznikaly vadami materiálu, poškozením, apod. Laboratorní měření drsnosti povrchu bylo provedeno v metrologické laboratoři katedry obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci dotykovou metodou s použitím přístroje Mitutoyo Surftest 2000-SV (viz obr. 3.13). Parametry přístroje jsou uvedeny v tab. 3.5. S ohledem na poloměr zaoblení špičky hrotu, lze usoudit, že hrot by neměl nikterak narušit povrch plastového vzorku (poškrábání povrchu) a tím znehodnotit měřený vzorek.



Obr. 3.13 : Mitutoyo Surftest 2000-SV

Pro hodnocení jakosti povrchu byly zvoleny tři základní parametry, které jednoznačně určují parametry povrchu. Jedním z nich byl parametr  $R_a$ , což znamená průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného povrchu, absolutní hodnotu pořadnic v rozsahu základní délky. V praxi je tato hodnota uvedena

na technických výkresech pro určení drsnosti povrchu výrobku. Druhý z parametrů byl Rz, tento parametr určuje největší výšku profilu a dále ukazuje součet hodnot nejvyššího výstupku a nejnižší hloubky na povrchu. Hodnota Rz se používá při mezinárodním určování drsnosti povrchu výrobku. Jako poslední byl měřen parametr Rt, který udává celkovou výšku profilu, a také součet nejvyšší hodnoty profilu a nejnižší hloubky na sledovaném profilu v rozsahu vyhodnocované délky. Drsnost povrchu zkušebních destiček byla několikrát měřena z obou stran, aby mohl být rozlišen rozdíl v drsnosti mezi rubovou stranou zkušební destičky (tvárnice vložky) a lící stranou (tvárník vložky). Výsledné průměrné hodnoty drsnosti jsou zpracovány v tab. 3.6 pro rubovou stranu a v tab. 3.7 pro lící stranu.

Tab. 3.5 Parametry měřicího přístroje Mitutoyo Surftest 2000-SV

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>jednotky</i>
Úhel hrotu	90	[°]
Zaoblení špičky	5	[μm]
Rychlost pohybu hrotu	0,5	[mm/s]
Celková délka	4,8	[mm]
Vyhodnocovaná délka	4	[mm]

Tab. 3.6 Hodnoty drsnosti zkušebních těles kompozitu pro rubovou stranu

<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>			
<b>čistý PP</b>	0,49±0,08	3,33±0,65	4,97±1,20			
<b>PP+smart</b>	0,81±0,21	6,79±1,87	9,86±2,70			
<i>plnivo</i>	<b>Len</b>			<b>Vlna</b>		
<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>
<b>PP+smart+10%</b>	2,14±0,26	14,56±2,06	19,58±3,19	1,36±0,32	11,35±2,23	17,45±3,63
<b>20%</b>	1,49±0,30	11,42±2,45	17,84±4,90	1,36±0,24	9,94±1,63	14,62±2,77
<b>30%</b>	1,97±0,87	14,05±2,31	19,35±2,17	2,15±0,50	14,51±2,86	20,00±4,34
<i>plnivo</i>	<b>Celulóza</b>			<b>Kokos</b>		
<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>
<b>PP+smart+10%</b>	1,64±0,41	11,53±2,57	16,42±3,28	1,40±0,26	10,82±2,16	16,79±3,37
<b>20%</b>	1,28±0,39	9,86±2,02	14,58±4,37	1,54±0,58	10,75±2,52	17,24±5,26
<b>30%</b>	2,11±0,64	13,87±3,59	20,14±4,39	1,60±0,28	11,90±1,92	18,02±3,28

Tab. 3.7 Hodnoty drsnosti zkušebních těles kompozitu pro lícni stranu

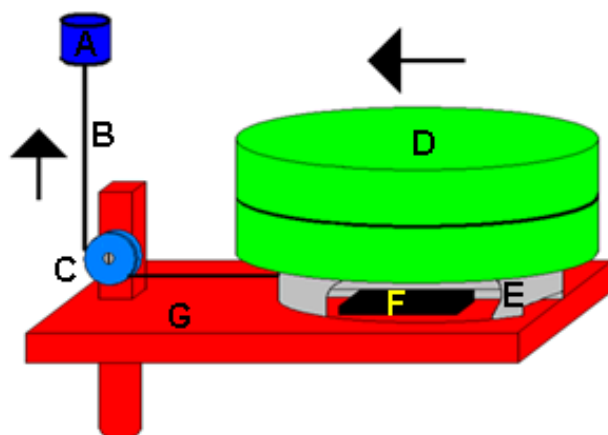
<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>			
<b>čistý PP</b>	0,16±0,06	1,36±0,51	2,12±1,16			
<b>PP+smart</b>	0,72±0,15	5,11±1,27	6,89±1,59			
<i>plnivo</i>	<b>Len</b>			<b>Vlna</b>		
<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>
<b>PP+smart+10%</b>	2,08±0,53	13,59±3,41	19,23±4,67	1,38±0,37	10,08±2,69	15,81±5,98
<b>20%</b>	1,59±0,22	11,13±2,08	15,82±3,56	1,42±0,36	9,99±2,02	14,00±3,85
<b>30%</b>	2,34±0,94	14,41±4,01	19,46±5,57	3,02±0,36	18,73±2,55	26,29±3,99
<i>plnivo</i>	<b>Celulóza</b>			<b>Kokos</b>		
<i>parametr</i>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>	<b>Ra[μm]</b>	<b>Rz[μm]</b>	<b>Rt[μm]</b>
<b>PP+smart+10%</b>	1,88±0,45	13,31±2,53	18,77±3,87	1,21±0,26	9,66±2,17	16,38±4,30
<b>20%</b>	1,32±0,38	9,90±2,03	14,92±3,71	1,86±0,62	12,78±3,34	20,44±5,29
<b>30%</b>	1,97±0,29	12,88±2,17	18,85±3,95	1,96±0,83	13,59±3,41	21,22±4,74

### 3.6 Stanovení koeficientu tření kompozitů

Měření hodnot koeficientu tření probíhalo v laboratoři zkoušení plastů Technické univerzity v Liberci na katedře strojírenské technologie. Vzhledem ke skutečnosti, že neexistuje platný mezinárodní předpis (norma) pro stanovení koeficientu tření plastových desek s tloušťkou větší než 1 mm, bylo měření provedeno s níže specifikovanými odchylkami dle normy ČSN EN ISO 8295 (viz kap. 2.1), která specifikuje metody pro stanovení koeficientu pro počáteční (statické) a smykové (dynamické) tření plastové folie a tenké desky (s tloušťkou do ca. 0,5 mm). Podstatou zkoušky je umístění zkoušených ploch tak, aby se dotýkaly v rovině pod stejnoměrným tlakem, přičemž se zaznamenává síla, která je potřebná k vzájemnému posunutí ploch a z ní následně stanoven statický a dynamický koeficient tření (viz kap. 2.1).

K experimentálnímu měření bylo použito zařízení, metody s pevným vodorovným zkušebním stolem z eloxovaného hliníku ( $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ ) a pohyblivým přípravkem pro umístění zkušebních vzorků a závaží tak, aby těžiště zátěžné síly bylo vždy ve středu zkušebního vzorku a byl tak zaručen rovnoměrný kontaktní tlak mezi plochami (viz obr. 3.14). Princip tohoto způsobu spočíval v tom, že se zkušební destička umístila do přípravku tak, aby mohly být měřeny kluzné vlastnosti (statický a dynamický koeficient tření) nejprve z rubové strany a po vyjmutí destičky z přípravku a jejím přetočení i kluzné vlastnosti z lícni strany. Pro každý kompozit bylo k stanovení koeficientu tření použito čtyř zkušebních vzorků (viz příloha 1 a příloha 2). Měřicí zařízení bylo složeno z několika částí, které jsou zobrazeny na obr. 3.15.





Obr 3.14 : Zkušební zařízení s pevným stolem.

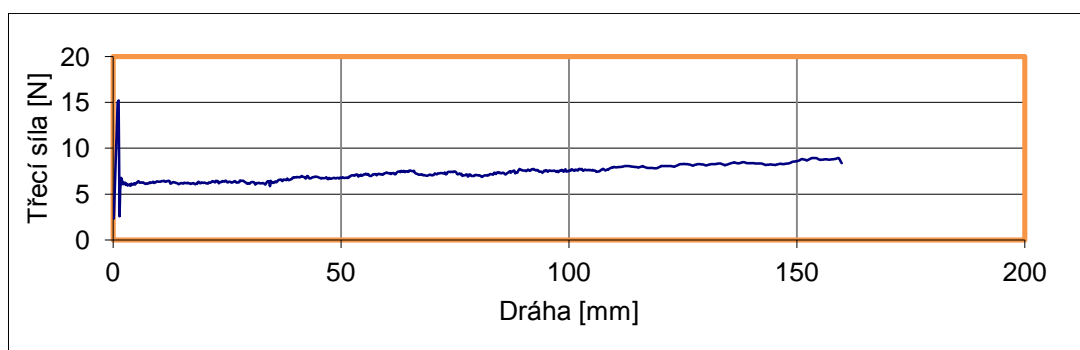
*A – přípravek, který je uchycen do 500 N snímací hlavy, B – vodící ocelové lanko,  
C – kladka, D – dvě závaží o celkové hmotnosti 10 kg,  
E – přípravek pro uchycení a zatížení zkušební destičky,  
F – zkušební těleso, G – pevný stůl*



*Obr. 3.15 : Části měřícího zařízení  
vlevo – dvě závaží o celkové hmotnosti 10 kg,  
vpravo – přípravek pro uchycení zkušební destičky*

Nepohyblivý stůl z eloxovaného hliníku, po kterém se pohybovala zatížená destička upevněná v přípravku rychlostí 100 mm/min, byl upevněn k příčnicku stroje Hounsfield H10KT s hnacím mechanismem, který vytvářel relativní pohyb mezi stolem a zkušebním vzorkem ve vodorovném směru (viz obr. 3.13). Součástí pevného stolu byla kladka, přes kterou byl přípravek pro uchycení a zatížení zkušební destičky spojen ocelovým lankem se snímací hlavou (500 N snímací hlava s přesností 0,5% působící síly v oblasti 2 % až 100 %). Na přípravek pro uchycení a zatížení zkušební destičky bylo vždy umístěno závaží tak, aby normálová síla vyvolaná hmotností přípravku včetně závaží (106,57 N) zajišťovala rovnoměrné zatížení zkušebního vzorku a jeho dobrý kontakt po celém jeho povrchu s podkladovým stolem.

Snímací zařízení zaznamenávalo sílu potřebnou k překonání tření v závislosti na vzdálenosti (dráze) pohybu zkušebního tělesa po stole (viz obr. 3.16, resp. příloha 3). Z grafických závislostí třecí síly na dráze pohybu zkušebního tělesa je zřejmé, že síla na počátku smykového pohybu vzrůstá lineárně až do maximální hodnoty, která určuje statickou třecí sílu. Během smykového pohybu při konstantní rychlosti byla zaznamenávána třecí síla v závislosti na dráze, která není s ohledem na sekundární vlivy související s pohybem zkušebního tělesa konstantní. Z těchto hodnot byla stanovena dynamická třecí síla, což je průměrná síla na vzdálenosti 60 mm, počítáno po startu, při relativním posunu kontaktních ploch (viz předpis ČSN EN ISO 8295). Z naměřených hodnot byly pro každý kompozitní materiál zpracovány průměrné výsledky a z nich byla vytvořena tabulka pro jejich porovnání. Nejprve byly vytvořeny tabulky statického koeficientu tření pro rubovou stranu (viz tab. 3.8) a pro lícni stranu výstřiku (viz tab. 3.9), následně pak tabulky dynamického koeficientu tření (viz tab. 3.10 a tab. 3.11), přičemž průměrná dynamická třecí síla byla stanovena na vzdálenosti 60 mm po překonání třecí síly, tedy mezi vzdálenostmi 10 mm až 70 mm po zahájení měření.



Obr. 3.16 : Graf zaznamenané třecí síly PP kompozitu v závislosti na dráze

Tab. 3.8 Hodnoty statického koeficientu tření (rubová strana)

Materiál	Čistý PP	$0,20 \pm 0,01$			
	PP+SMART	$0,10 \pm 0,00$			
	Plnivo	celulóza	len	vlna	kokos
	PP+SMART+10%	$0,09 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$
	+20%	$0,05 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
	+30%	$0,05 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$



Tab. 3.9 Hodnoty statického koeficientu tření (lícní strana)

Materiál	Čistý PP	0,08 ± 0,00			
	PP+SMART	0,06 ± 0,01			
	Plnivo	celulóza	len	vlna	kokos
	PP+SMART+10%	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,05 ± 0,00	0,05 ± 0,01
	+20%	0,05 ± 0,00	0,08 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,00
	+30%	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,00

Tab. 3.10 Hodnoty dynamického koeficientu tření (10-70 mm / rubová strana)

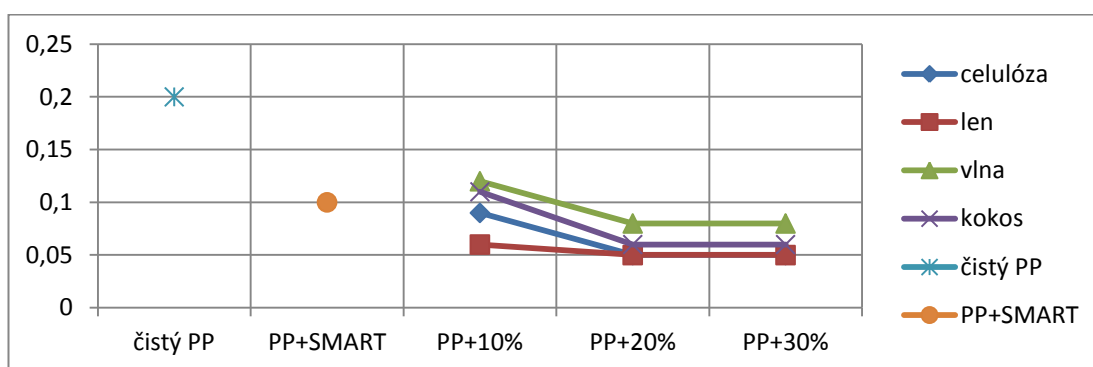
Materiál	Čistý PP	0,17 ± 0,00			
	PP+SMART	0,06 ± 0,00			
	Plnivo	celulóza	len	vlna	kokos
	PP+SMART+10%	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,08 ± 0,00	0,05 ± 0,00
	+20%	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,05 ± 0,00
	+30%	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,06 ± 0,00	0,04 ± 0,01

Tab. 3.11 Hodnoty dynamického koeficientu tření (10-70 mm / lícní strana)

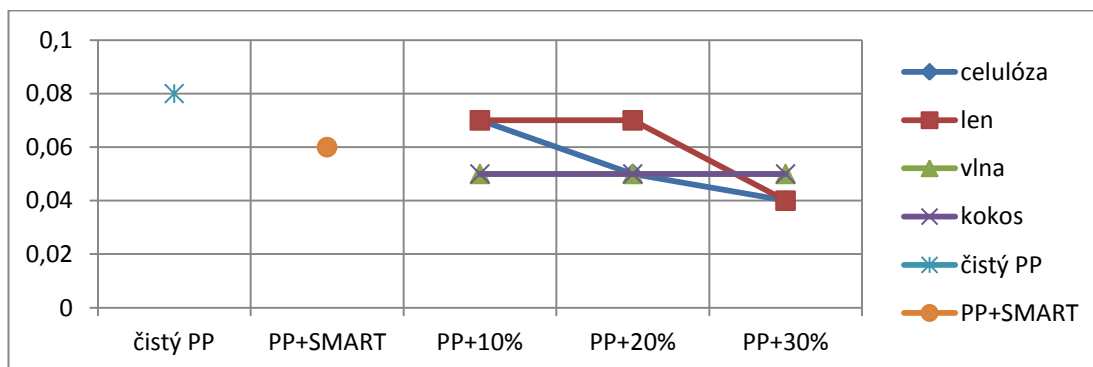
Materiál	Čistý PP	0,07 ± 0,01			
	PP+SMART	0,03 ± 0,00			
	Plnivo	celulóza	len	vlna	kokos
	PP+SMART +10%	0,04 ± 0,00	0,06 ± 0,00	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,00
	+20%	0,04 ± 0,00	0,08 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,03 ± 0,00
	+30%	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,00	0,03 ± 0,00	0,03 ± 0,00

#### 4. Hodnocení výsledků a jejich diskuse

Z výsledků experimentálního stanovení tribologických vlastností kompozitu s polypropylenovou maticí a přírodními vlákny lze konstatovat, že přírodní vlákna rostlinného a živočišného původu příznivě ovlivňují výslednou hodnotu koeficientu statického a dynamického tření. Experimentálně stanovené hodnoty koeficientů tření kompozitních výstřiků (v závislosti na typu a množství přírodních vláken) jsou přehledně uvedeny v tab. 3.8 až tab. 3.11. Koeficient tření byl stanoven na rubové i lící straně výstřiku, přilehající při vstřikování taveniny materiálu do formy k povrchu tvárnice, resp. tvárníku.



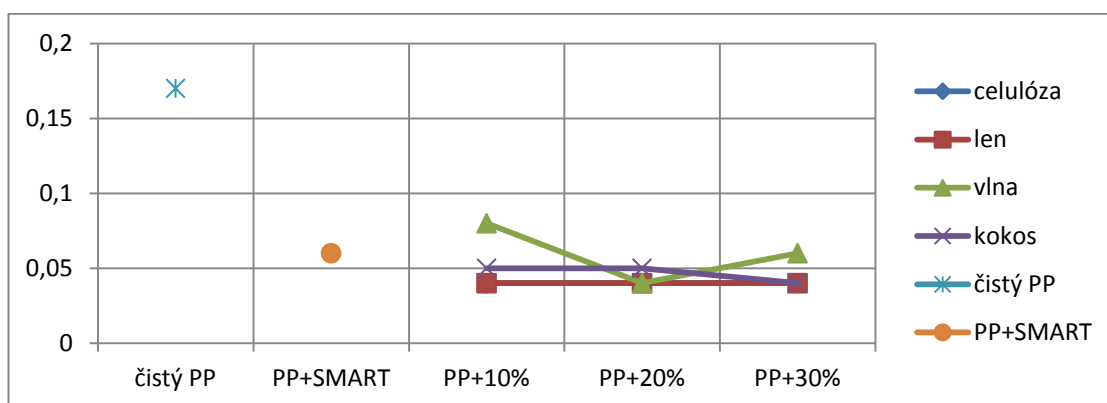
Obr. 3.17 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření na rubové straně



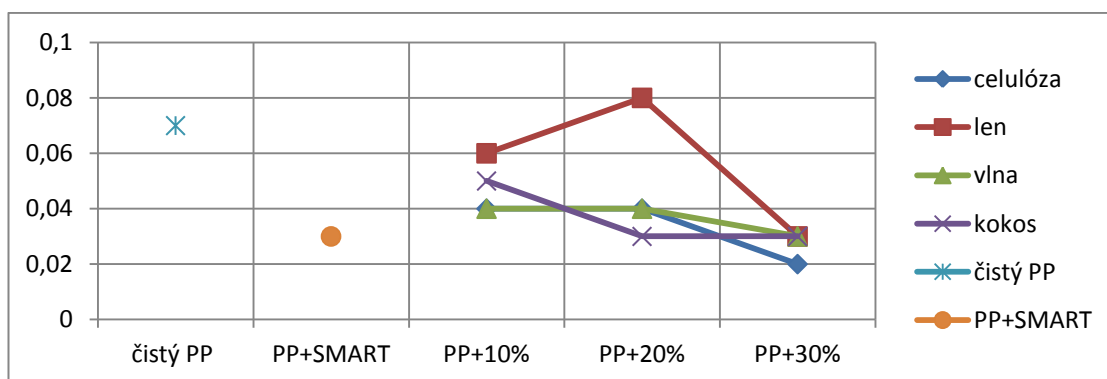
Obr. 3.18 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření na lící straně

Vývoj hodnot statického a dynamického koeficientu tření v závislosti na typu a množství vláken přidávaných do polypropylenové matrice je graficky zpracován na obr. 3.17 a obr. 3.19 pro rubovou stranu výstřiku, resp. na obr. 3.18 a obr. 3.20 pro lící stranu výstřiku. Z těchto závislostí lze konstatovat, že přírodní vlákna v polymerním kompozitu snižují koeficient tření. Výrazný pokles koeficientu tření by zaznamenán již přidavkem adhezního činidla Smart, jehož jednotlivé složky byly přidávány v kapalně formě k polypropylenu při výrobě granulátu (ca. o 25% až 50% v případě statického koeficientu tření na lící, resp. rubové straně a 57% až 65 % v případě dynamického koeficientu tření na lící, resp. rubové straně výstřiku). Další snížení koeficientu tření (především statického) bylo docíleno přidavkem

přírodních vláken, zejména lněných (obdobně tedy, jako je tomu známo v případě minerálních plniv, např. talku [18]). S vyšším obsahem přírodních vláken docházelo k poklesu statického koeficientu tření. V případě dynamického tření množství přídatku přírodních vláken nemá vliv na změnu hodnoty dynamického koeficientu tření, resp. získané výsledky a rozptyl naměřených hodnot toto nepotvrzují. Současně je třeba upozornit na kolísání hodnot koeficientů tření u kompozitů s přídatkem 20 hm.% přírodních vláken, které mohlo být ovlivněno jeho přípravou, resp. kvalitou přírodních vláken, neboť nejprve byl v průběhu experimentu připraven polymerní kompozit s 20 hm.% přírodních vláken, šarže s 10 hm.% a 30 hm.% byly připraveny až z další, následné dodávky vláken od výrobců. Případné rozdíly v rozměrech vláken, jakož i v jejich zbytkové vlhkosti po sušení, mohou být příčinou uvedené nuance. Rozdíly v koeficientech tření, jak statického, tak dynamického, u lící a rubové strany jsou dány rozdílnou drsností jejich povrchu způsobenou v důsledku rozdílné drsnosti tvarové dutiny formy, tj. tvárníku ( $R_a = 1,450$ ) a tvárnice ( $R_a = 0,160$ ).



Obr. 3.19 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření na rubové straně

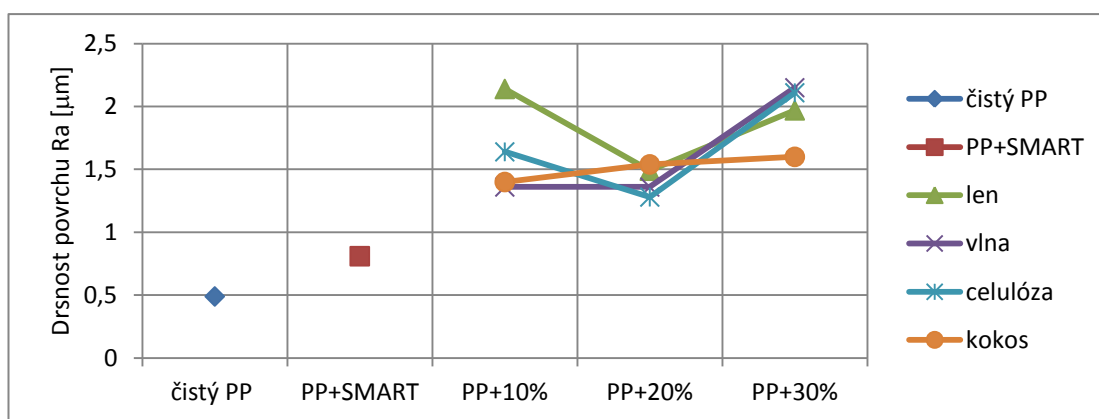


Obr. 3.20 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření na lící straně

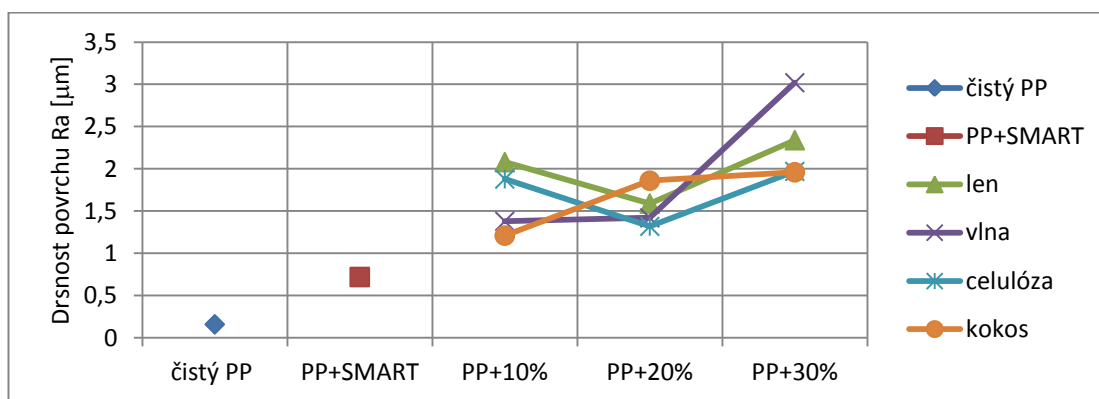
Z konstatování, že přírodní vlákna v kompozitu s polypropylenovou maticí mají příznivý vliv na pokles statického koeficientu tření lze předpokládat, že tato skutečnost příznivě ovlivní fázi vyjímání kompozitního výrobku z dutiny formy v procesu vstřikování a tím i jeho tvarovou přesnost. Nižší koeficient

statického tření umožní vyjímání výstřiku z formy při nižších vyhazovacích silách a tím i celkový pokles reziduálního napětí ve výstřiku. Při aplikaci kompozitů do reálných podmínek vstřikování by bylo vhodné tento předpoklad ověřit v navazujících studiích, resp. experimentálních pracích na katedře strojírenské technologie.

Z pohledu kvality povrchu výstřiku (hodnocené parametry drsnosti Ra, Rz a Rt) lze konstatovat, že přírodní vlákna zvyšují drsnost jejich povrchu, přičemž s ohledem na rozptyl měřených hodnot drsnosti dílů v závislosti na množství vláken lze prohlásit, že změna drsnosti povrchu s rostoucím obsahem vláken se neprojeví (viz obr. 3.21 až obr. 3.22). Nuance při 20 hm.% vláken v kompozitu lze přičíst opět kvalitě rozdílných dodávek vláken, tj. případným rozdílům v jejich rozměrech a zbytkové vlhkosti, které mohou ovlivnit tokové chování taveniny v dutině formy a tím i konečnou drsnost povrchu výstřiku.



Obr. 3.21 : Vývoj hodnot drsnosti povrchů Ra na rubové straně



Obr. 3.22 : Vývoj hodnot drsnosti povrchů Ra na lící straně

## 5. Závěr

Trendem několika posledních let je nahradit běžné, syntetické polymerní materiály vyrobené z fosilních surovin alternativním přírodním produktem, popřípadě využít přírodních materiálů jako plniva nahrazující syntetická vlákna, která jsou z enviromentálního hlediska předmětem zájmu polymerních zpracovatelů. Použití přírodních vláken v polymerních kompozitech je tak zajímavou materiálovou obměnou, které směřuje i do oblasti zpracování polymerů technologií vstřikování na díly konstrukčního charakteru. Jak ukazují výsledky výzkumných týmů, včetně týmu katedry strojírenské technologie, lze aplikací přírodních vláken z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností v polymerních kompozitech dosáhnout například zvýšení jejich pevnosti a tuhosti, snížení tažnosti i tekutosti taveniny materiálu. Při aplikaci kompozitů s přírodními vlákny na díly automobilového průmyslu bylo možné konstatovat, že vstřikované díly velmi dobře splnily požadavky tvarové stálosti za nízkých a vysokých teplot i bezpečnost z hlediska hoření. Cílem předložené bakalářské práce, která svým způsobem navazuje na provedené studie v uvedené oblasti, bylo zhodnotit vliv přírodních vláken rostlinného a živočišného původu na tribologické vlastnosti kompozitu s polypropylenovou matricí. V souvislosti s tímto požadavkem a v souladu se zadáním bakalářské práce bylo provedeno zhodnocení koeficientu tření a drsnosti povrchu u kompozitních výstřiků s vlákny ovčí vlny, kokosu, lnu a celulózy v závislosti na jejich množství.

Z experimentálního měření lze konstatovat, že přírodní vlákna snižují koeficient tření, zejména statický koeficient tření, přestože značný pokles koeficientu tření byl u výstřiků zaznamenán již přidávkou modifikátoru zajišťující dostatečnou adhezi mezi hydrofilními vlákny a hydrofobní polypropylenovou matricí. Snížení hodnoty statického tření je pozitivním faktorem, který bude příznivě ovlivňovat vyjímání kompozitního výstřiku z tvarové dutiny formy a tím také jeho tvarovou přesnost a velikost zbytkového napětí ve vstřikovaných dílech. Zbytkové napětí ve výstřiku vzniká nejen v důsledku smykového namáhání taveniny a přednostní orientace makromolekul, nehomogenního stavu napjatosti výstřiku, anizotermního chlazení, ale také v důsledku vyšších vyhazovacích sil, které jsou tím větší, čím větší je adheze výstřiku k povrchu formy a kluzné tření při jeho vyjímání. Aplikace přírodních vláken způsobila také zvýšení drsnosti povrchu vstřikovaných dílů z kompozitního materiálu s polypropylenovou matricí, přičemž s ohledem na rozptyl měřených parametrů drsnosti lze říci, že množství vláken (do 30 hm.%) nemělo při daných technologických podmínkách výrazný vliv na drsnost povrchu výstřiku.

Bakalářská práce byla rozčleněna do třech tematických celků. V teoretické části se zabývá charakteristikou třecích vlastností polymerů a základními faktory ovlivňující tribologické vlastnosti plastů, resp. plastových dílů. V druhé experimentální části je popsán postup přípravy kompozitních materiálů granulací za studena, vstřikování zkušebních těles i způsob stanovení

drsnosti povrchu, koeficientu statického a dynamického tření při vzájemném pohybu zkušebních těles po hliníkové desce s povrchovou úpravou eloxování. V třetí části je provedeno zhodnocení experimentálního měření, jehož závěry byly shrnuty v předchozím odstavci závěrečné kapitoly bakalářské práce.

## Seznam použité literatury:

- [1] <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [2] POUZADA, A.S., FERREIRA E.C. a PONTES A.J. *Friction properties of moulding thermoplastics*. New York: ELSEVIER, 2006.
- [3] ČSN EN ISO 8295:2004.
- [4] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, ISBN 80-737-2133-3.
- [5] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, ISBN 978-80-7300-250-3.
- [6] NEUHÄUSL, E. Vady výstřiků – 1. díl: Příčiny vzniku vad a studené spoje. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, s. r. o., roč. 2010, č. 3, s. 58.
- [7] <http://www.petroleum.cz/vyroby/polypropylen.aspx>
- [8] RYMUZA, Z. *Tribology of anti-friction polymers*. Warszawa: WNT, 1986.
- [9] FRIEDRICH, K. *Friction and wear of polymer composites*. New York: Elsevier, 1986, ISBN 04-444-2524-1.
- [10] <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=250&mark=fluorace>
- [11] <http://www.fts-de.com/fluor-e1.htm>
- [12] <http://www.bgs.eu/>
- [13] MAŇAS, D., DANĚK M. Vliv radiačního síťování na vlastnosti plastů. *Technický týdeník*. Praha: SpringerMedia, roč. 2007, č. 5, s. 6-7.
- [14] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, ISBN 80-214-2443-5.
- [15] LENFELD, P. *Závěrečná zpráva projektu TA 01010946 (1.etapa řešení)*. TU v Liberci, 2012.
- [16] *Handbook of fiber chemistry*. 3rd ed. Editor Lewin Menachem. Boca Raton: Taylor, 2007, 1044 s. ISBN 08-247-2565-4.
- [17] *Patentová přihláška [patent]*. WO 2011/083045 A1.
- [18] PETERA, P. *Otěruvzdornost polypropylenu v závislosti na množství talku*. Bakalářská práce. Liberec: TU v Liberci, 2005.

## **Seznam příloh**

Příloha 1	Tabulky hodnot statického koeficientu tření
Příloha 2	Tabulky hodnot dynamického koeficientu tření
Příloha 3	Grafické průběhy třecích síl na dráze



## Příloha 1

### Tabulky hodnot statického koeficientu tření

Tab. P1.1 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření čistého polypropylenu a polypropylenu s přidaným aditivem SMART z rubové a lící strany

materiál	čistý PP		PP + smart	
množství v %				
strana vzorku	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku				
1	0,2085	0,0816	0,0971	0,0643
2	0,1959	0,0802	0,1028	0,0600
3	0,2067	0,0885	0,0943	0,0471
Průměr	0,20	0,08	0,10	0,06
Odchylka	0,01	0,00	0,00	0,01

Tab. P1.2 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a lněným vláknem z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + len					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0512	0,0700	0,0512	0,0765	0,0685	0,0471
2	0,0526	0,0555	0,0396	0,0793	0,0536	0,0374
3	0,0679	0,0746	0,0501	0,0934	0,0520	0,0393
Průměr	0,06	0,07	0,05	0,08	0,06	0,04
Odchylka	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tab. P1.3 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a celulóзовým vláknem z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + celulóza					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0840	0,0618	0,0536	0,0513	0,0513	0,0546
2	0,0921	0,0538	0,0558	0,0510	0,0502	0,0314
3	0,0848	0,0826	0,0469	0,0441	0,0574	0,0385
Průměr	0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04
Odchylka	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01

Tab. P1.4 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření polypropylenů s přidaným aditivem SMART a vláknem ovčí vlny z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + vlna					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,1277	0,0432	0,0818	0,0711	0,0809	0,0659
2	0,1145	0,0485	0,0923	0,0477	0,0637	0,0599
3	0,1252	0,0469	0,0730	0,0646	0,0829	0,0546
Průměr	0,12	0,05	0,08	0,06	0,08	0,06
Odchylka	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01

Tab. P1.5 : Vývoj hodnot statického koeficientu tření polypropylenů s přidaným aditivem SMART a kokosovým vláknem z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + kokos					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,1112	0,0450	0,0645	0,0516	0,0682	0,0569
2	0,0915	0,0533	0,0564	0,0514	0,0637	0,0599
3	0,1179	0,0624	0,0673	0,0510	0,0613	0,0546
Průměr	0,11	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05
Odchylka	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

## Příloha 2

### Tabulky hodnot dynamického koeficientu tření

Tab. P2.1 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření čistého polypropylenu a polypropylenu s přidaným aditivem SMART z rubové a lící strany

materiál	čistý PP		PP + smart	
množství v %				
strana vzorku	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku				
1	0,1762	0,0635	0,0583	0,0310
2	0,1683	0,0691	0,0582	0,0298
3	0,1699	0,0829	0,0626	0,0349
Průměr	0,17	0,07	0,06	0,03
Odchylka	0,00	0,01	0,00	0,00

Tab. P2.2 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a lněným vláknem z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + len					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0353	0,0569	0,0367	0,0758	0,0353	0,0309
2	0,0383	0,0567	0,0395	0,0762	0,0352	0,0258
3	0,0386	0,0558	0,0404	0,0764	0,0353	0,0223
Průměr	0,04	0,06	0,04	0,08	0,04	0,03
Odchylka	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. P2.3 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a celulóзовým vláknem z rubové a lící strany

materiál	PP + smart + celulóza					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0433	0,0464	0,0451	0,0378	0,0356	0,0273
2	0,0443	0,0420	0,0434	0,0334	0,0362	0,0241
3	0,0398	0,0436	0,0456	0,0341	0,0362	0,0215
Průměr	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02
Odchylka	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. P2.4 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a vláknem ovčí vlny z rubové a lící strany

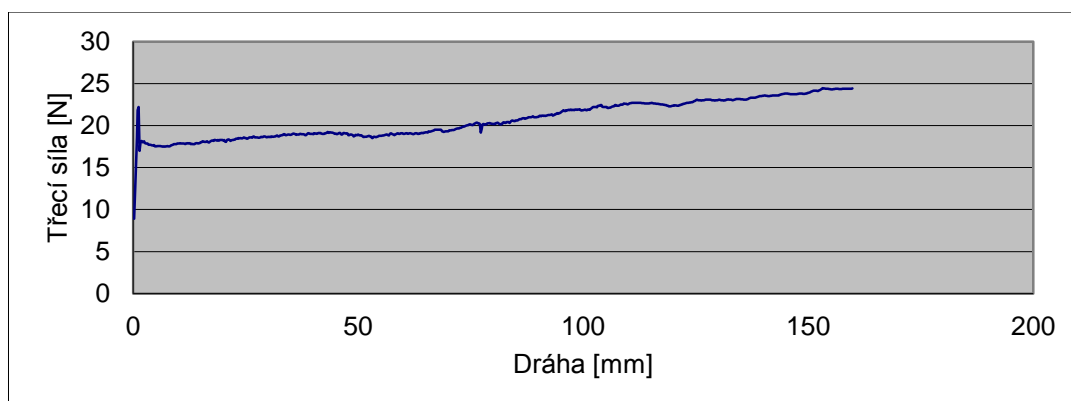
materiál	PP + smart + vlna					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0816	0,0246	0,0413	0,0458	0,0574	0,0527
2	0,0815	0,0260	0,0392	0,0426	0,0592	0,0521
3	0,0874	0,0356	0,0416	0,0453	0,0556	0,0497
Průměr	0,08	0,03	0,04	0,04	0,06	0,05
Odchylka	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. P2.5 : Vývoj hodnot dynamického koeficientu tření polypropylenu s přidaným aditivem SMART a kokosovým vláknem z rubové a lící strany

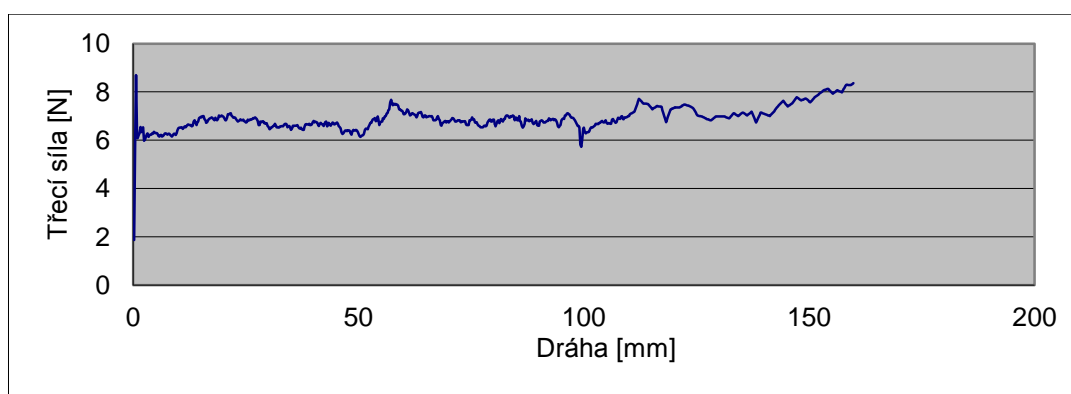
materiál	PP + smart + kokos					
množství v %	10%		20%		30%	
strana vzorku	rub	líc	rub	líc	rub	líc
číslo vzorku						
1	0,0506	0,0457	0,0547	0,0313	0,0503	0,0359
2	0,0548	0,0502	0,0524	0,0308	0,0464	0,0364
3	0,0495	0,0463	0,0553	0,0316	0,0432	0,0312
Průměr	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03
Odchylka	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00

## Příloha 3

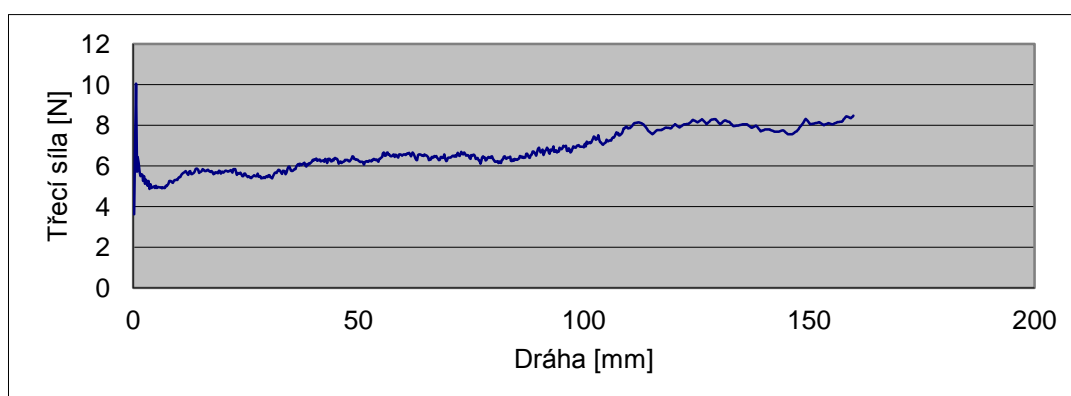
Grafické průběhy třecích síl na dráze



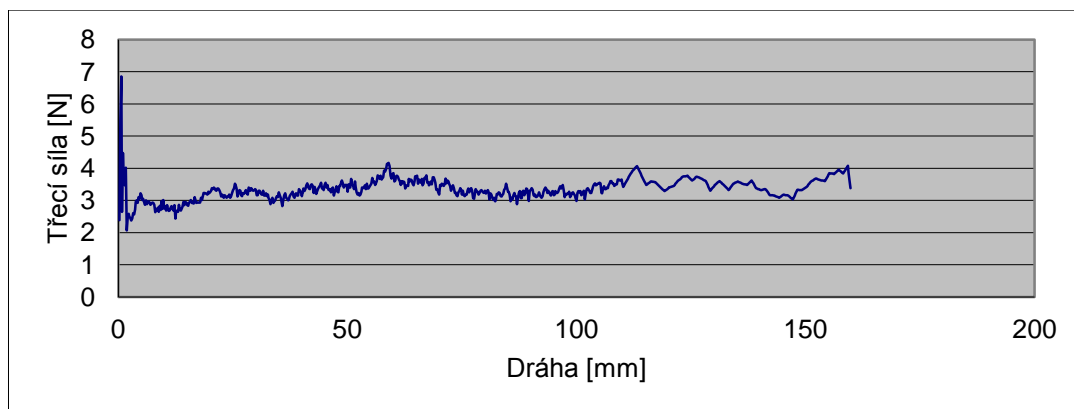
Obr. P3.1 : Grafický průběh třecí síly na dráze čistého PP z rubové strany



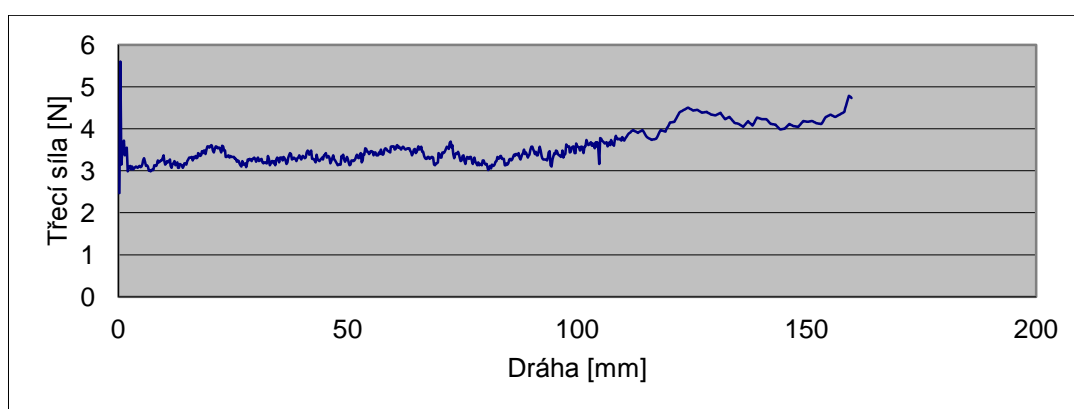
Obr. P3.2 : Grafický průběh třecí síly na dráze čistého PP z lící strany



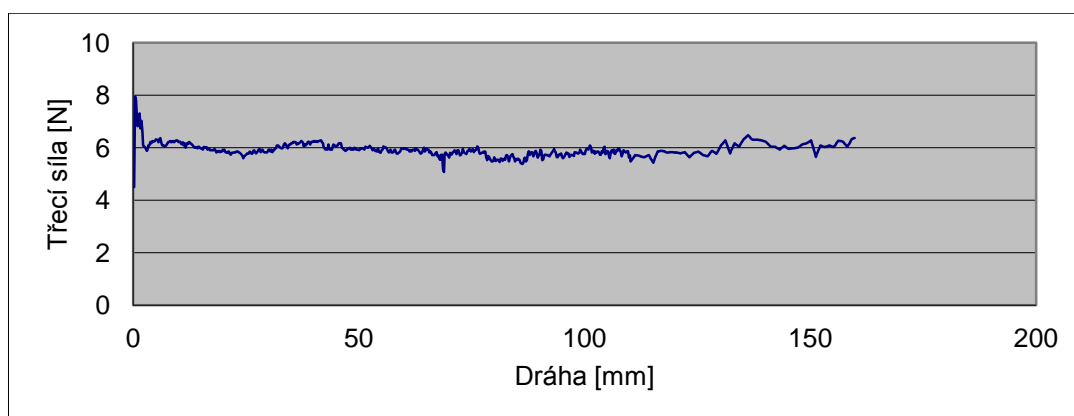
Obr. P3.3 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidáním aditivem SMART z rubové strany



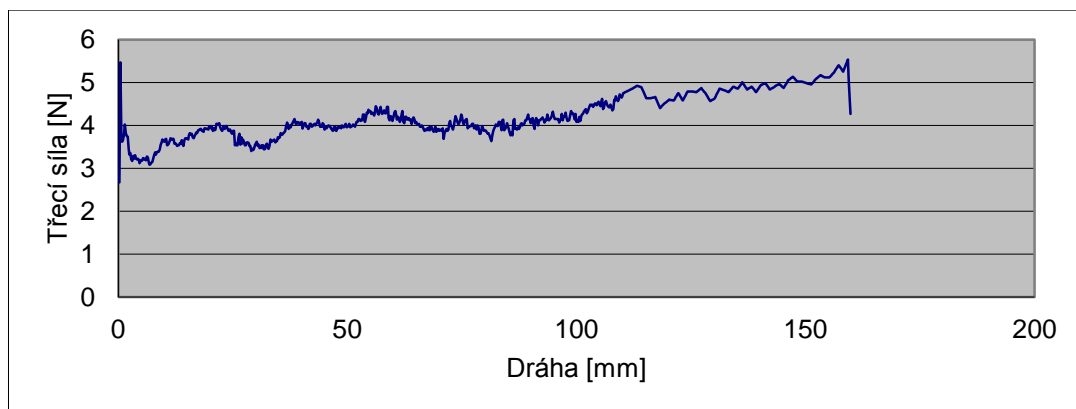
Obr. P3.4 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART z lící strany



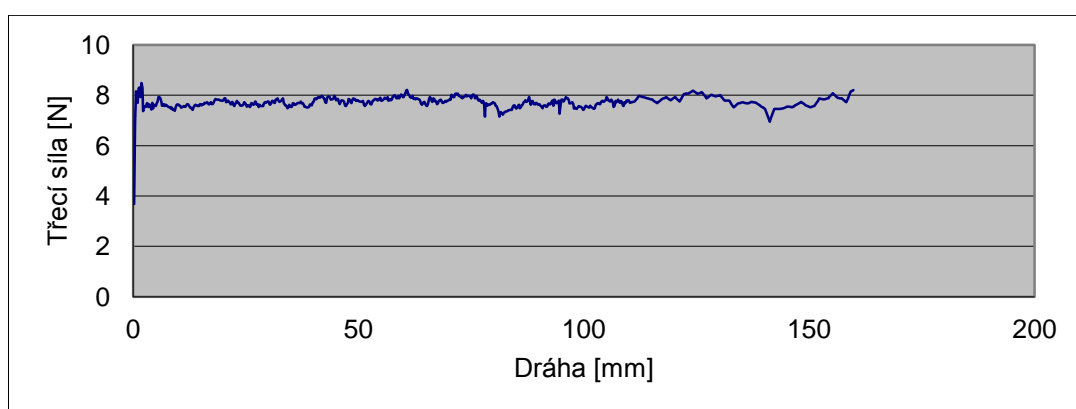
Obr. P3.5 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% lněného vlákna z rubové strany



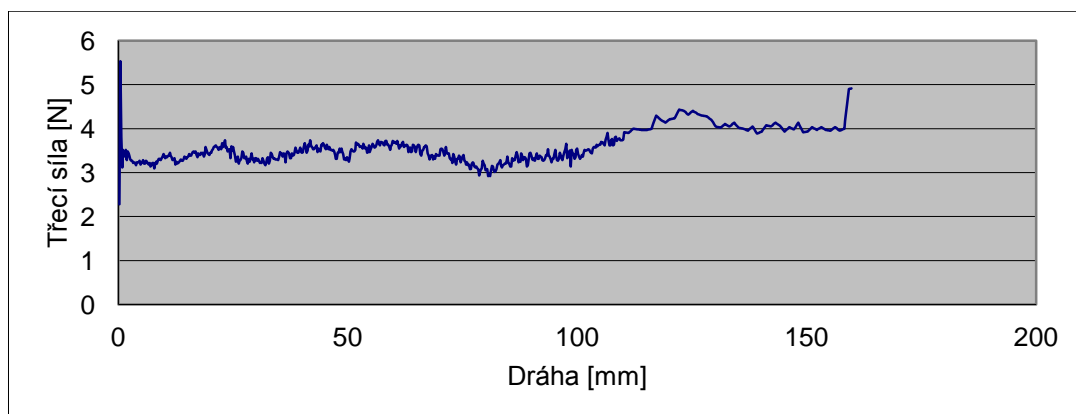
Obr. P3.6 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% lněného vlákna z lící strany



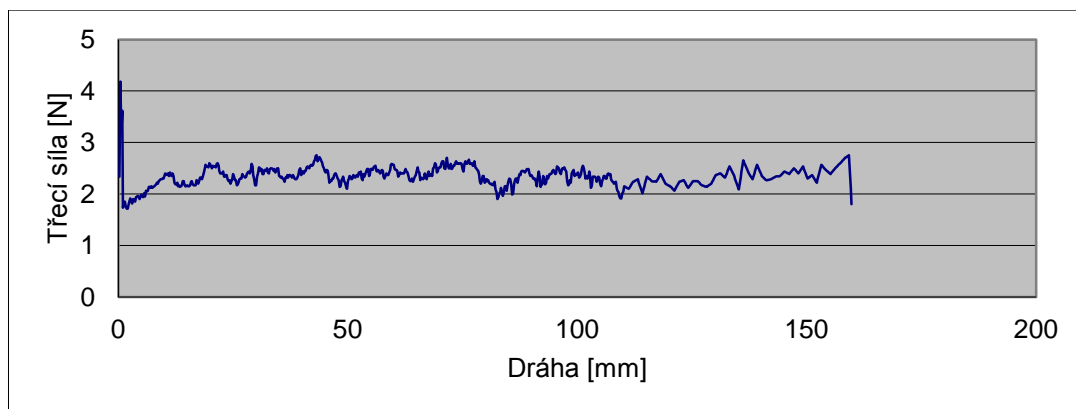
Obr. P3.7 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% lněného vlákna z rubové strany



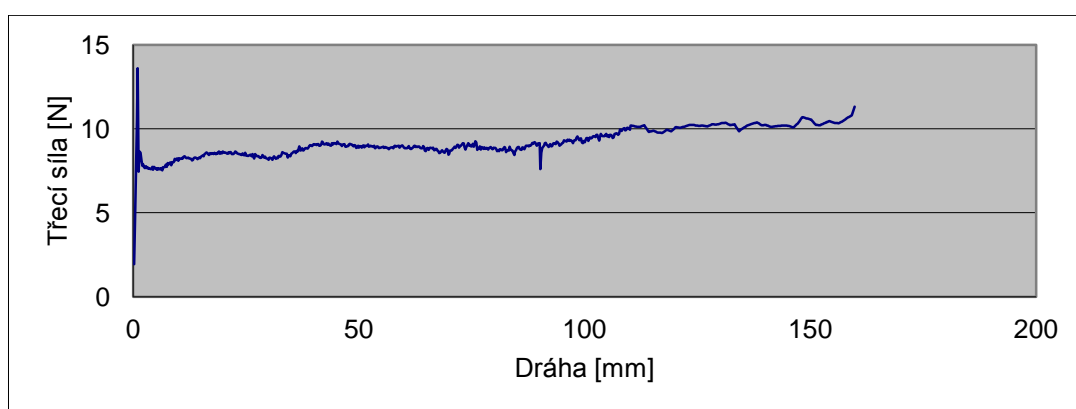
Obr. P3.8 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% lněného vlákna z lící strany



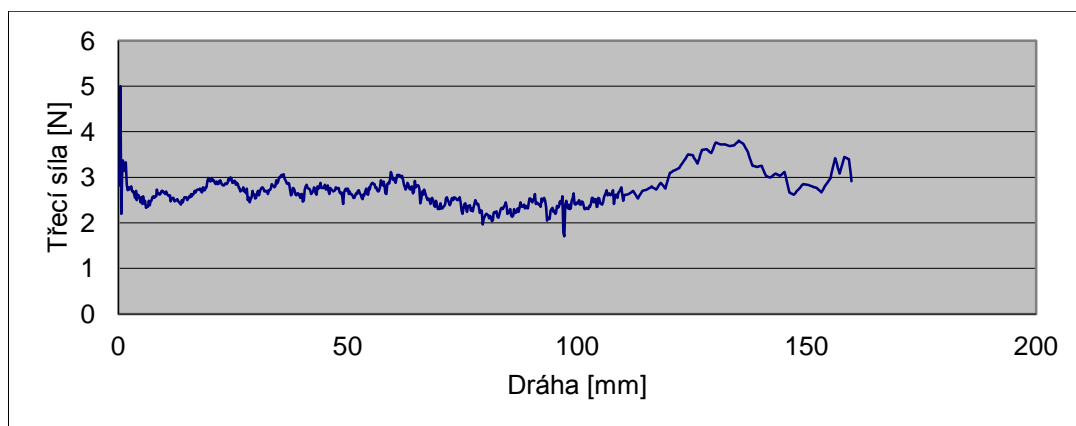
Obr. P3.9 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% lněného vlákna z rubové strany



Obr. P3.10 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% Iněného vlákna z lícní strany

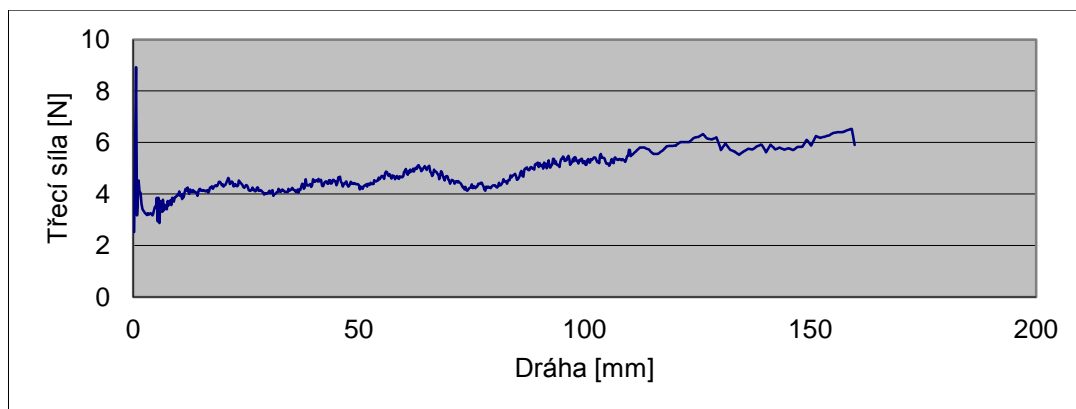


Obr. P3.11 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% vlákna ovčí vlny z rubové strany

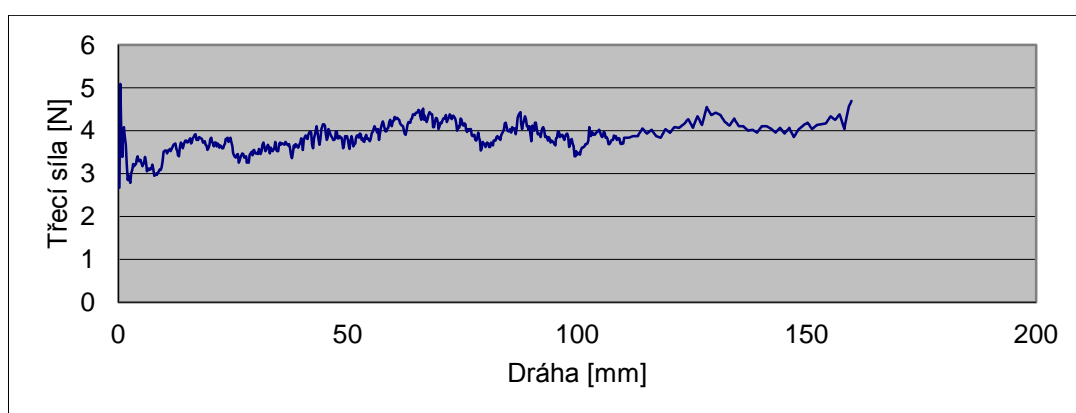


Obr. P3.12 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% vlákna ovčí vlny z lícní strany

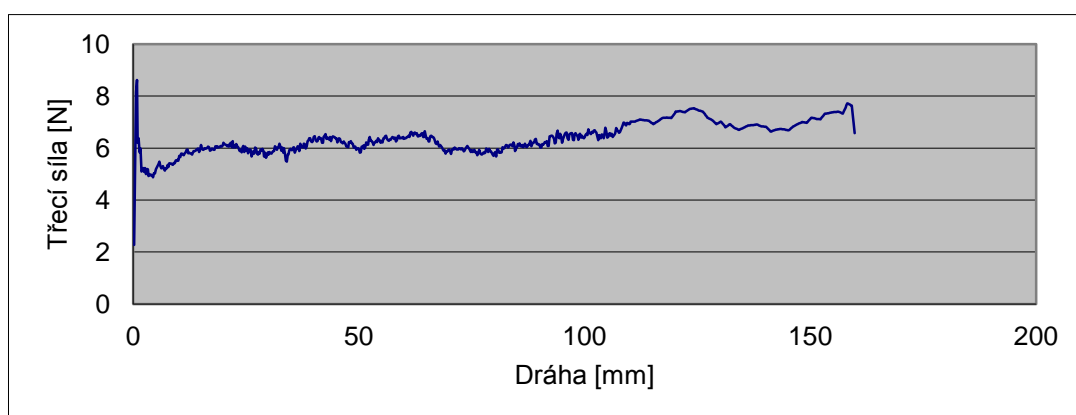




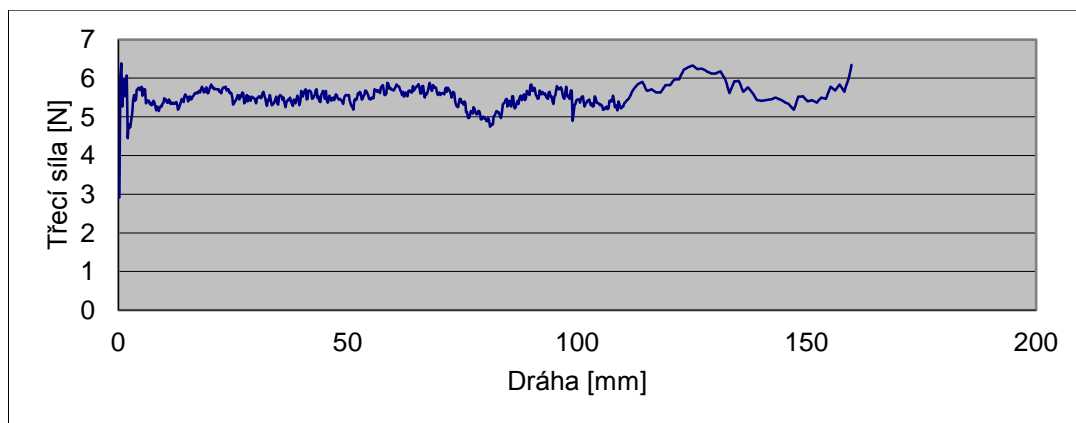
Obr. P3.13 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% vlákna ovčí vlny z rubové strany



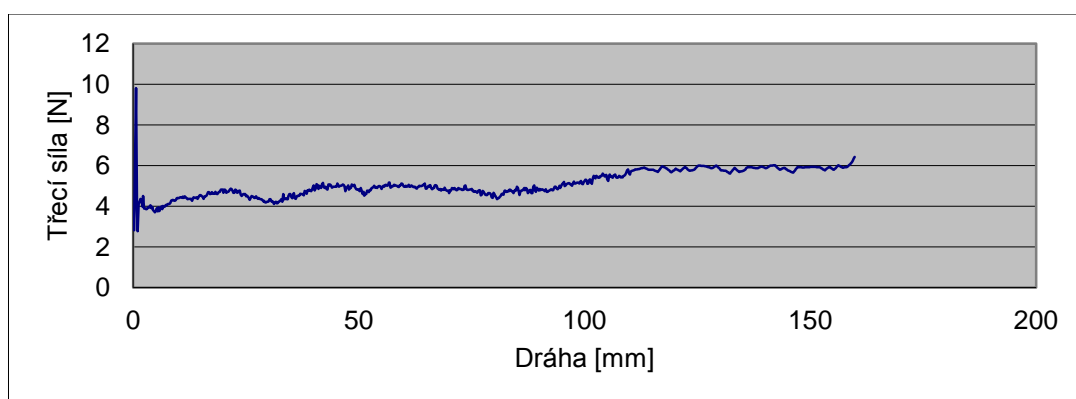
Obr. P3.14 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% vlákna ovčí vlny z lícni strany



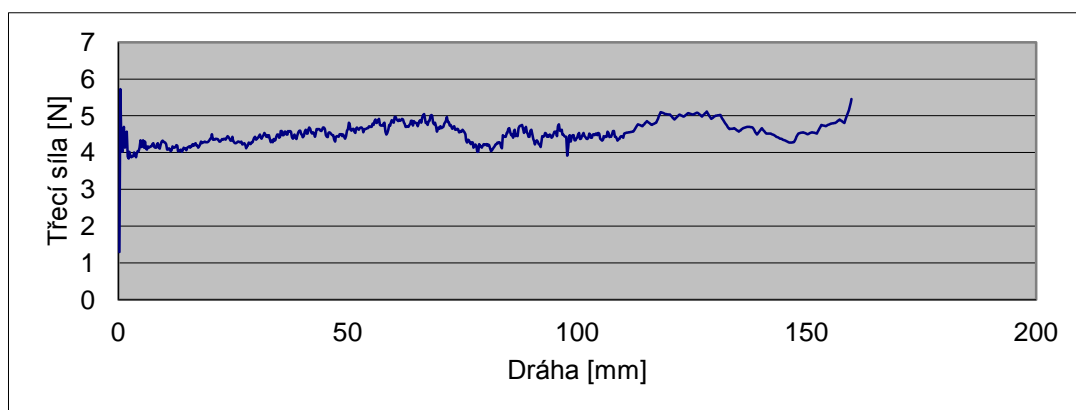
Obr. P3.15 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% vlákna ovčí vlny z rubové strany



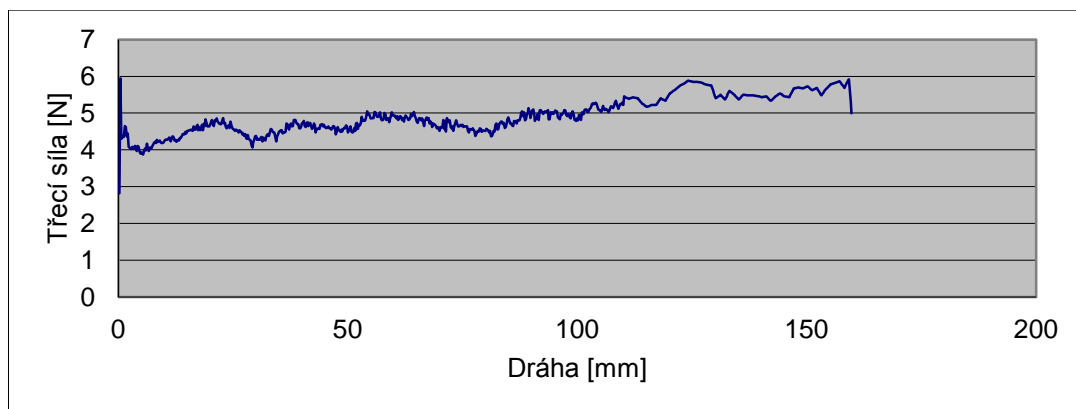
Obr. P3.16 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% vlákna ovčí vlny z lícni strany



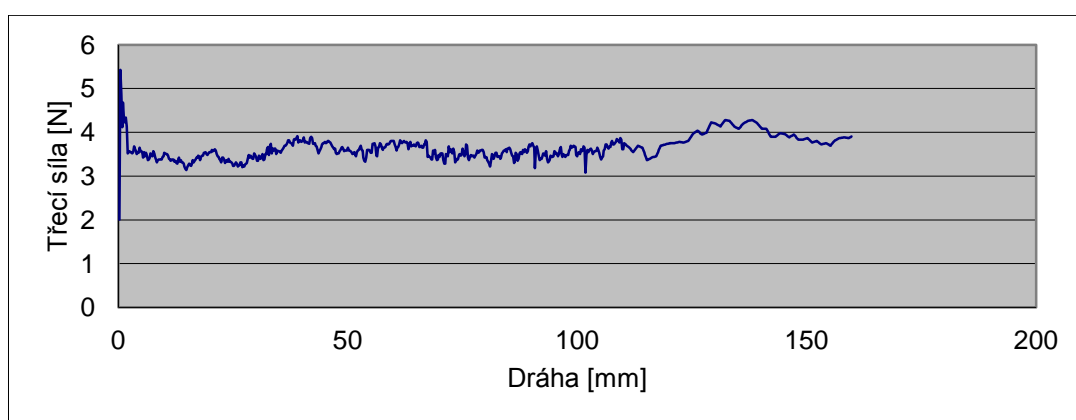
Obr. P3.17 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% celulóзовého vlákna z rubové strany



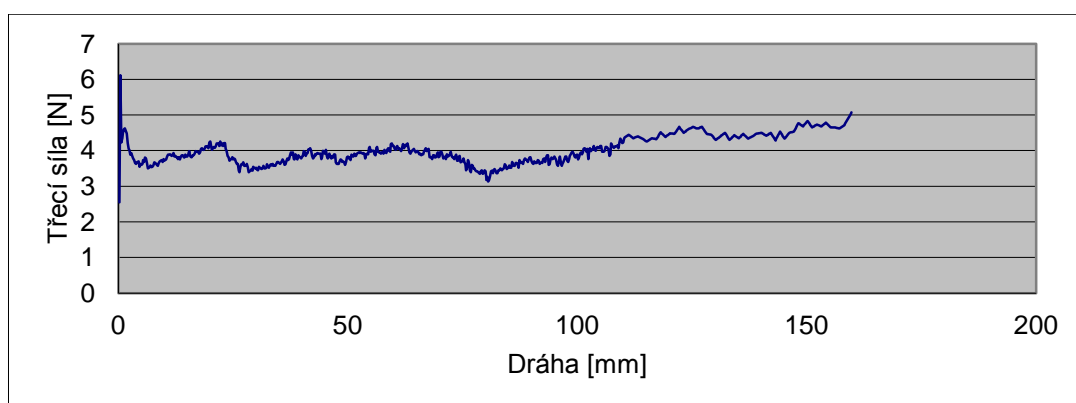
Obr. P3.18 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% celulóзовého vlákna z lícni strany



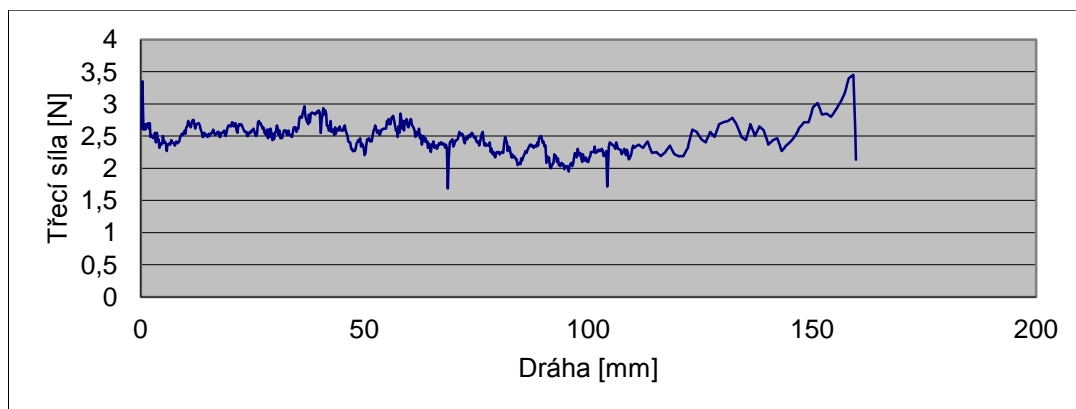
Obr. P3.19 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% celulóзовého vlákna z rubové strany



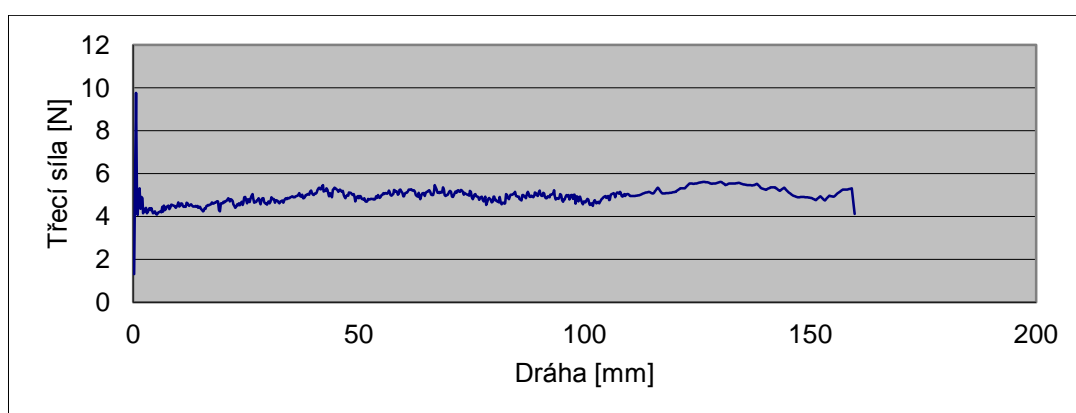
Obr. P3.20 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% celulóзовého vlákna z lící strany



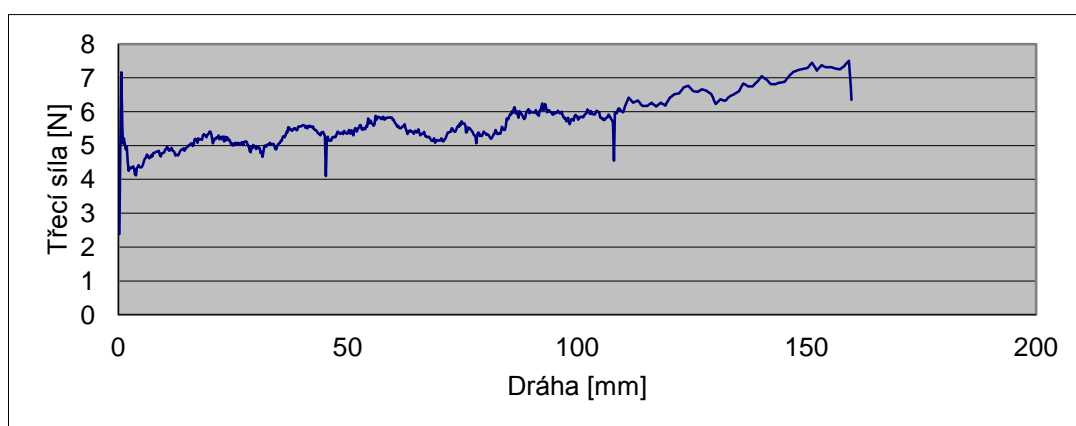
Obr. P3.21 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% celulóзовého vlákna z rubové strany



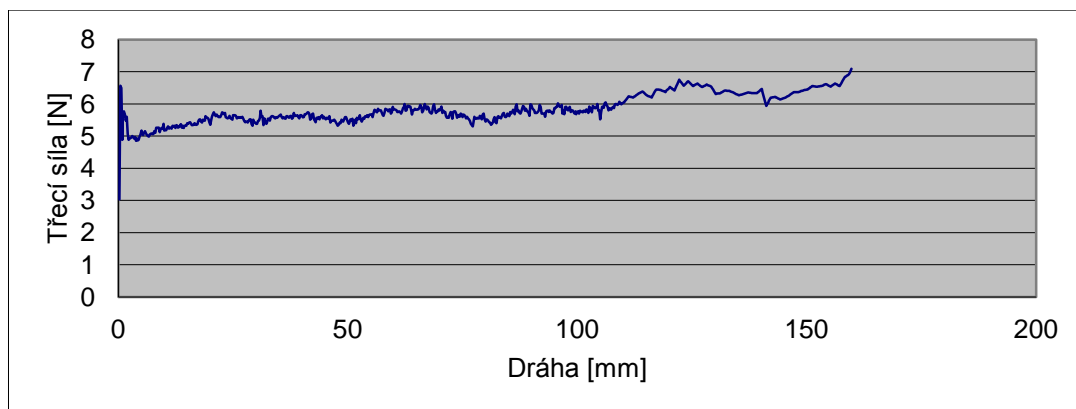
Obr. P3.22 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% celulóзовého vlákna z lícní strany



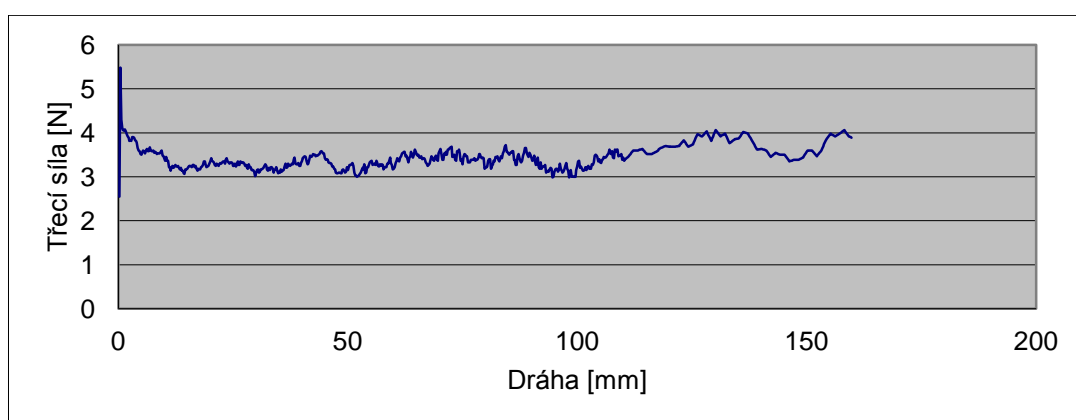
Obr. P3.23 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% kokosového vlákna z rubové strany



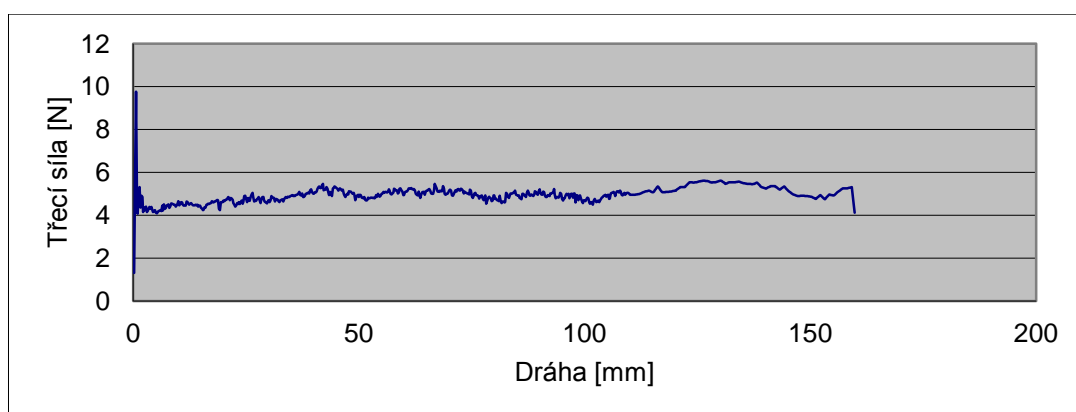
Obr. P3.24 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 10 hm.% kokosového vlákna z lícní strany



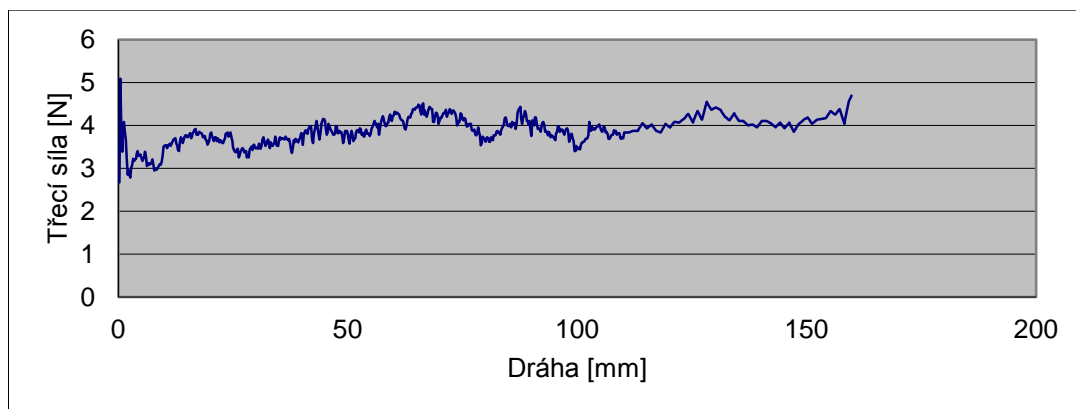
Obr. P3.25 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% kokosového vlákna z rubové strany



Obr. P3.26 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 20 hm.% kokosového vlákna z lící strany



Obr. P3.27 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% kokosového vlákna z rubové strany



Obr. P3.28 : Grafický průběh třecí síly na dráze PP s přidaným aditivem SMART a 30 hm.% kokosového vlákna z lící strany

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 25.5.2012

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purpose of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledge sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a konsultant.

Date 25.5.2012

Signature